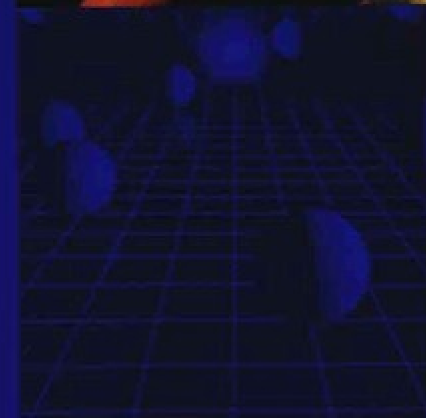


国际机械工程先进技术译丛







产品制造系统设计优化

System Design Optimization for Product Manufacturing

（美）Masataka Yoshimura 著
王军锋 闫锋欣 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际视野　科技前沿



上架指导　工业技术／机械工业设计

ISBN 978-7-111-38590-5

定价：42.00元

国际机械工程先进技术译丛

产品制造系统设计优化

（美）Masataka Yoshimura 著

王军锋 闫锋欣 等译



机 械 工 业 出 版 社

译 丛 序

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化的机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色

化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1）精品重点高质　本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2）专家选译把关　本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3）引纳地区广泛　主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4）内容先进丰富　在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制

造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5）读者层次面广　面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

制造业是人类社会所有其他产业的基础之一，关系到人们日常生活的方方面面。近百年来，产品制造模式和方法发生了多次巨大的变化，从手工小批量生产到机械化大批量、大规模生产，再到车间任务型生产、订单生产、用于参与的设计与制造。每一次制造模式与方法的变革都是伴随人类社会的经济、文化等多方面的发展完成的。这些发展激发了人类对所有产品不断提高要求，这些要求反过来作用于科学技术、生产管理模式等与制造相关的因素，促使制造业不断向前发展，制造出更为符合人类需求的产品。

本书主要介绍了与产品设计和制造相关的优化技术。只有在工程研究和实际的生产制造中掌握优化方法，了解优化技术的发展趋势、方向，才能不断推陈出新，提升制造系统的能力和效率，提升产品质量和用户满意度，才能推动制造模式和方法的发展，推动人类社会的不断向前发展。

本书第 1 章介绍了产品制造技术的发展，预测了制造业未来发展的方向和趋势。第 2 章介绍了产品制造过程中的评价标准和优化基础，主要关注了产品质量与性能、制造成本、产品需求、研发周期、库存和交货时间、与生产方法相关的问题等，另外还阐述了制造过程的灵活性、加工能力、自然环境等问题，说明了评价标准与优化的关系。第 3 章给出了产品制造的创新技术，包括从多个可信设计中选出最优解的过程，概念设计阶段的创意产生，还引入了并行工程和协同工作的概念。第 4 章介绍了产品制造中的人类因素，从人的能力、客户和制造商的关系、人机工程学、感性工程学等方面进行了阐述。第 5 章介绍了产品制造的支撑技术，主要包括产品形态描述技术、性能特征分析技术、产品设计创意支撑技术、数据库技术、制造支撑技术、客户需求信息获取技术、企业管理支撑技术等。第 6 章介绍了产品制造的优化技术，主要包括基本的优化技术和实施困难、有效实施优化方法的基本策略、系统优化的基本方法、系统设计优化的策略、备选设计方案的优选法等。第 7 章给出了决策方法，说明了制订决策的困难及基本规划、制订决策的基本原则以及协同环境下的决策方法。第 8 章阐述了创意设计的优化与权衡，并说明了两者的关系。

本书的作者吉村正孝（Masataka Yoshimura）是东京大学的名誉教授，早稻田大学访问教授、高级研究员，大阪技术学院访问教授。他多年从事与产品制造相关的教学和科研工作，成果卓著，曾创立了模态分析法，构建了对产品设计和制造进行综合评价的方法，这些都是并行工程的基础理论。20 世纪 90 年代，他

把产品的美学和感性特征与用户满意度相结合，提出了协同设计方法，并根据分层多目标优化法建立了相应的优化方法。他的研究成果发表于相关领域内世界著名的刊物，是诸多刊物的编委。他曾积极组织参与了与制造相关的国际会议和相关活动，为世界制造业的发展作出了杰出贡献，获得了众多荣誉。

本书可谓是产品制造系统优化技术领域的权威指南。正是由于本书作者丰富的从业经验和研究经历，才使得本书成为一本优秀的畅销书籍，一本对于产品设计与制造人员和学习相关知识与技术的人们来说不可缺少的宝典。感谢本书的作者吉村正孝，正是他的不懈努力和无私奉献，才使我们能拥有这本学术著作。

西南科技大学的王军锋翻译了本书的第1、2、3、6、7、8章，西北农林科技大学的闫锋欣负责翻译了第4、5章。西南科技大学的武艳芳完成了第7章部分内容的初稿翻译，西北农林科技大学的宁东红、米晓、张虹虹、杨亚琼完成了部分章节的初译工作，西北工业大学的胡滨、舒相榕和西安欧亚学院的赵延兵、韩二伟参与了部分译稿的译、校工作。全书的终审和定稿工作由王军锋完成。其他参与了本书部分翻译工作的人员还有：苏力争、杨振朝、张莹、曹少飞、戚彬、陈伟鸿、谭邦建、饶锦锋、张延超、王淑侠、王振军、顾婷、李妙玲、徐景辉、戴高明和周杰等。

感谢西南科技大学的刘云东和李磊，他们绘制了本书中所有的图表。感谢我的妻子郭偎和女儿王若水，她们是我的精神支柱。感谢所有为本书的翻译、出版提供了帮助的人！

在翻译过程中，译者已及时修正了原书中出现的些许印刷错误，在此不再一一指出。

鉴于译者的英文理解能力和中文表达能力有限，译文难免出现错误和纰漏，望领域内各位同行和专家予以批评指正，不胜感激！

译　者

序　　言

本书从优化的角度介绍并阐述了与产品制造技术相关的内容。产品制造与人类生活息息相关，是最重要、最基础的活动之一，它直接或间接地影响着世界上所有人的日常生活和经济生活。一百年来，产品的制造方法正经历着巨大的发展和变化。现在，成功的制造业必须考虑产品设计和开发过程中的一系列影响因素，不仅要在激烈的产品功能、外在表现、质量和制造成本的竞争中胜出，还要满足日益严格的产品安全、环境保护、回收利用和用户主观满意度等要求，这些方面对用户来说非常重要。在这种形势下，产品制造业要在比以往更复杂和艰难的情况下作出有利的决策。传统的决策方法依赖于特定领域的改善和优化，其必须让位于更高效的决策方法。新的决策方法能考虑到各种相关因素，在逻辑上也更加精确，但要达到此目的，系统优化技术是必不可少的。

通常，人们用数学方法来描述优化概念和方法，但在工程研究和实际的工业应用中，严格的数学描述并不是关键所在，如何抓住复杂优化问题的基本思路、找到有效的方法才是重点。“优化”一词经常被使用，虽然人们对它的概念并不十分清楚，例如它通常用来描述通过某种方法获得更好的方案，或者由备选方案中选出更好的方案。真正的最优结果是很难确定的。在实际中，涉及基本的优化概念和相关描述时，优化结果就是能够达到的最理想结果。我经常听到在工业或经济领域工作的学生说，他们在实验室学到的优化概念对于他们的工作非常有用，对于优化概念的理解实际上比特定的优化工具更有价值。

如上文所述，要产生出更有价值的设计和更具吸引力的产品，必须要让所有影响因素达到很好的平衡状态，这需要了解优化概念、掌握优化技术。此外，新的产品制造技术陆续出现，制造商需要了解优化技术的发展趋势、发展方向和实际应用方法，才能更好地通过引入优化技术来获得竞争优势。本书将尽可能多地介绍与未来产品制造技术相关的重要优化技术。

在第 1 章中，我们将介绍过去近一百年来产品制造模式的变化。这些内容也预示了未来产品制造行业的特征，特别是那些更具优势的概念、方法和技术。第 2 章将介绍判断一些关键优化技术与评价相关要素适应性和特征的标准，还将讨论评价标准和优化过程的关系、各评价标准之间复杂的相互冲突关系、利用多目标 Pareto 优化解集解决产品优化问题的详细过程。第 3 章将介绍创新产品制造的基本概念和策略，概念设计阶段的创意产生、并行工程和协同工作。人力是实现产品制造创新目标非常重要的因素。第 4 章介绍产品制造和人类相关重要特征之

间的关系，帮助决策人员克服产品制造过程中的各方面困难的支持技术和系统是必不可少的。第5章阐明并解释关键的支撑技术，如信息网络系统的作用。为了在使用支撑系统时能产生最好的可能决策结果，必须选择适当的优化方法。第6章描述了当前产品设计的优化技术，介绍了包括系统优化设计的基本方法和策略，如何制造出更好的产品取决于更好的决策结果。第7章介绍了产品设计和制造的基本决策方法。产品设计和制造过程中有效的协同优化是获取最佳产品设计方案的有效方法之一。产品制造细节直接影响着大部分工业企业的成功和可持续性发展，特别是那些在世界上有着很大文化影响的企业。第8章讨论了创意设计的优化与权衡，其目标是在考虑重要的社会和环境问题的同时，将产品设计过程中的创造性、协同优化所带来的效益和产品制造所带来的文化影响最大化。

本书中的大部分内容都是我在东京大学设计与制造信息系统实验室和系统优化实验室的研究成果。我要特别感谢东京大学的同事们，包括 Shinji Nishiwaki 教授、Kazuhiro Izui 博士、Masakazu Kobayashi 博士（现在日本名古屋的丰田工业大学任职）以及其他在实验室里与我共事多年的学生。我还要感谢整理了本书英文稿的 John E. Goodman 先生，绘制了本书中插图的 Hiromi Ishizuka 女士。特别感谢我的妻子 Machiko，在过去的岁月里她给了我坚定不移的支持和鼓励。最后，感谢 Anthony Doyle 先生（英国伦敦 Springer 出版有限公司）建设性的意见和友好的帮助。

Masataka Yoshimura
于日本京都

作者简介

吉村正孝（Masataka Yoshimura），现任东京大学名誉教授，早稻田大学访问教授、高级研究员，大阪技术学院访问教授。截至2009年，他已在东京大学从事教学与研究工作34年。他早先从事于机床结构的颤动分析研究，并创立了模态分析法（Modal Analysis Method）。20世纪80年代，他提出并构建了产品设计与制造的综合评价方法。这些研究成果是20世纪90年代在全球范围内广受关注的并行工程（Concurrent Engineering）的基础。为了利用不同工程领域工程师协同工作的优势，他提出了有效的产品协同设计概念和方法。该方法把美学特征与传统的用户满意度评价目标有效地结合了起来，并根据分层多目标优化方法（Hierarchical Multiobjective Optimization Method）建立了系统的设计优化方法，使得与产品优化相关的所有因素都得以有效评估。

他的研究成果已发表了二百余篇英文论文，分别刊载于ASME（American Society of Mechanical Engineers，美国机械工程师协会）、IJPR（International Journal of Production Research，生产研究国际期刊）、CERA（Concurrent Engineering: Research and Applications，并行工程：研究与应用）、WCSMO（World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization，结构与多学科优化世界大会）、JSME（Japan Society of Mechanical Engineers，日本机械工程师协会）、JSPE（Japan Society for Precision Engineering，日本精密工程协会）以及其他期刊和会议论文集中。他因对ASME、JSME、JSPE等协会的长期贡献成为这些协会的会士，还出版了大量关于产品设计与制造工程、产品优化等方面的著作。他影响并推进了全球关于设计工程的相关活动。

他是ASME设计自动化会议（Design Automation Conference，ASME）的组织者之一，同时也是该会议论文集（1994—2000）的评审专家之一，该大会某主题会议的组织者，亚洲区域的联络员。他是IJPR、IJPE（International Journal of Performability Engineering，国际可执行性工程期刊）及其他刊物的编委。曾获奖项包括：1976年日本精密工程协会（JSPE）最佳论文奖，1985年和1986年日本机床工程促进协会（Japan Society for the Promotion of Machine Tool Engineering）最佳论文奖，2004年JSME设计工程分会杰出成就奖，2004年JSME设计工程分会杰出设计奖，2007年JSME杰出成就奖，2008年日本计算工程与科学协会（Japan Society for Computational Engineering and Science）最佳论文奖，2009年ASME设计自动化奖。

目　　录

第 1 章　产品制造技术的发展

20 世纪，产品制造业的发展引出了产品制造目标和技术的发展方向等问题，产品与用户之间的关系也受到了广泛关注。如今，复杂产品的设计规模已从原子级、纳米级技术领域扩展到了全球范围，但保持以人体尺度为核心的重要性仍在讨论过程中。本章介绍了 20 世纪产品制造规范的变化，并解释了推动这种革命性变化的各种动力。本章的讨论还为未来产品制造业的发展指明了方向，特别是那些促进产品制造业发展的概念、方法和技术等。

1.1　产品制造概述

先进产品制造的主要目标是开发并制造那些能满足人们更高生活需求的产品，还有那些能让生活变得更加舒适、高效并使人得到更多满足的辅助产品。图 1.1 所示为一些与高质量生活相关的产品。所有产品的加工制造都取决于相关技术的发展水平。

在石器时代，早期的人类通过制作长矛和石质工具来猎杀动物、维持生命、收集可食用的植物、最大限度地保证自身的安全。这些产品都适合当时人手的形状，使用起来非常符合人体尺度。

在成千上万年的进化过程中，人类制造出了无数种产品。当今最高端的消费类产品与高质量的生活息息相关，如交通工具和为通信、商务、休闲等开发的电子类设备、娱乐产品等。这些产品及其相关技术覆盖了广泛的范围，从对原子的巧妙处理到量子效应的开发再到不朽的建筑（如大坝和大都市），但却很少将人体尺度作为设计的中心考虑。在社会发展的过程中，人类设计并建造出了更加高效的机场和铁路，为的是在短时间内把乘客送达目的地；先进的发电厂和配电网提供了更加稳固的基础设施；不断变大、变高的建筑使用了更加复杂的材料和温度控制技术来提供更高的舒适度。

一方面，如果把人类活动对自然环境和地球的影响作为一个整体考虑，将这一思想结合到产品设计与开发过程的必要性就更加明显；另一方面，当前人们似乎把主要的注意力都放在了小范围内的问题上，如把个人产品变得更加微型化，以提供更多的便利性、经济性和舒适性。在科学研究人员发明了把十亿分之一米大小范围内的特征应用到实际生产的方法之后，纳米技术受到了广泛的关注，日常生活相关产品都致力于追求更轻的质量、更高级的功能和更多的零件。在更小

的范围内，科研人员在原子和分子领域内的一些研究也取得了突破性进展，这将很快会对社会产生深刻的影响。

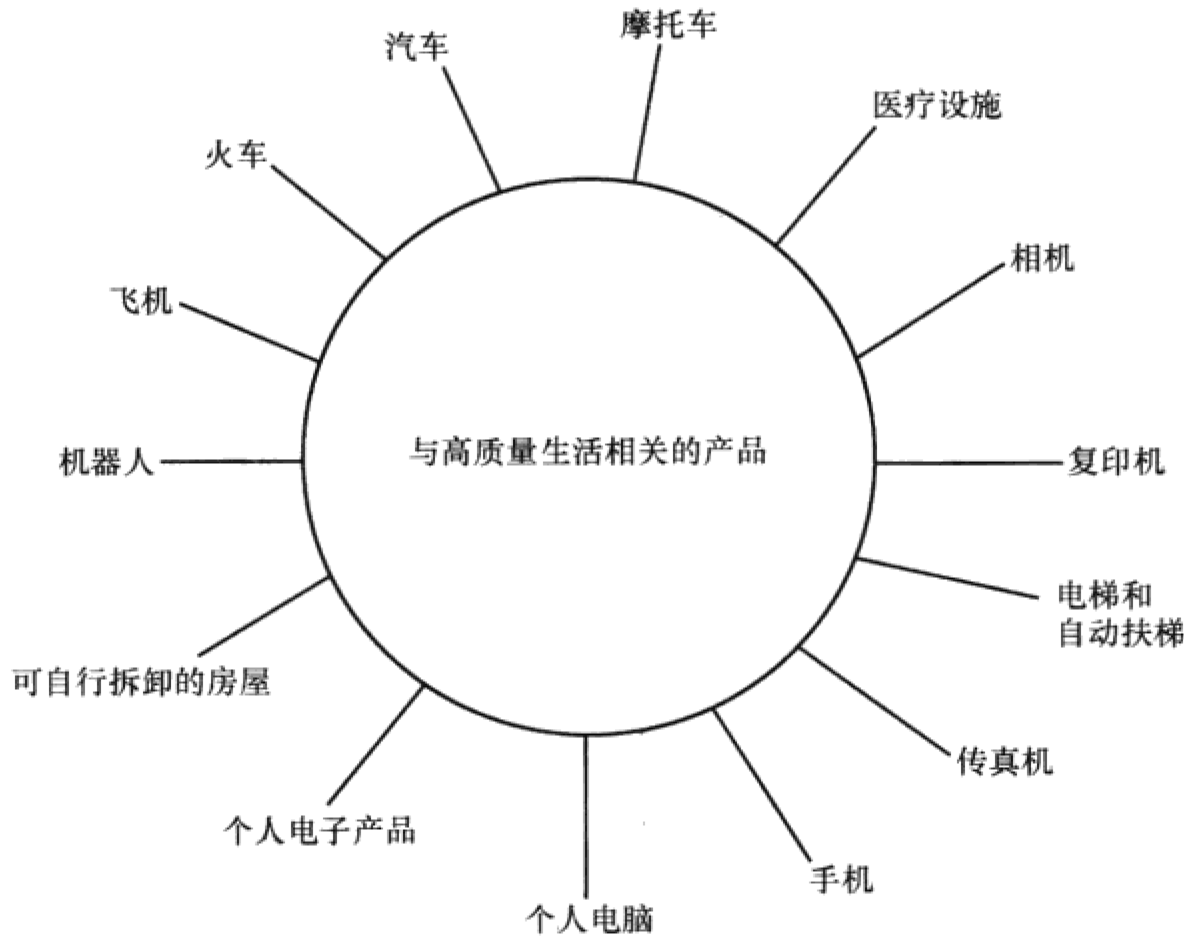


图 1.1 与高质量生活相关的产品

图 1.2 所示为当前产品制造业的覆盖范围。当前的产品制造覆盖了从原子、分子到家用产品再到汽车、火车、飞机、摩天大楼、空间站甚至是巨量土方工程等不同层次的范围。因此，消费类产品的设计、制造、销售及使用几乎都与不断提升的生活水平有关。对于人体尺度的深刻认识至关重要，因为它几乎处于以上所有范围的中心位置。忽视人类需求，也就是那些牺牲人体尺度，过于关注特定范围的产品制造业都可能存在巨大缺陷或明显的危害。成功产品的设计与生产几乎总是取决于对以上尺度和范围之间的关系、产品的使用环境、产品的用户等多方面因素的缜密考虑。



图 1.2 当前产品制造业的覆盖范围

当前的产品可分为两大类：

① 消费者购买、使用的产品。

② 用来制造以上产品的工业产品。

图 1.3 所示为消费者、消费类产品制造商以及工业产品制造商之间的关系。消费者的“钱袋子”自然而然地决定了对某种产品的需求，这也影响了产品制造业和相关的支撑产业。当某种产品的销量上升，受产品生产的特定需求影响，相应的制造商就会增多，相关的商业活动会辐射到其他制造商和商业部门。设计并开发有用、具有吸引力、成熟的消费类产品刺激并促进着制造业的发展。

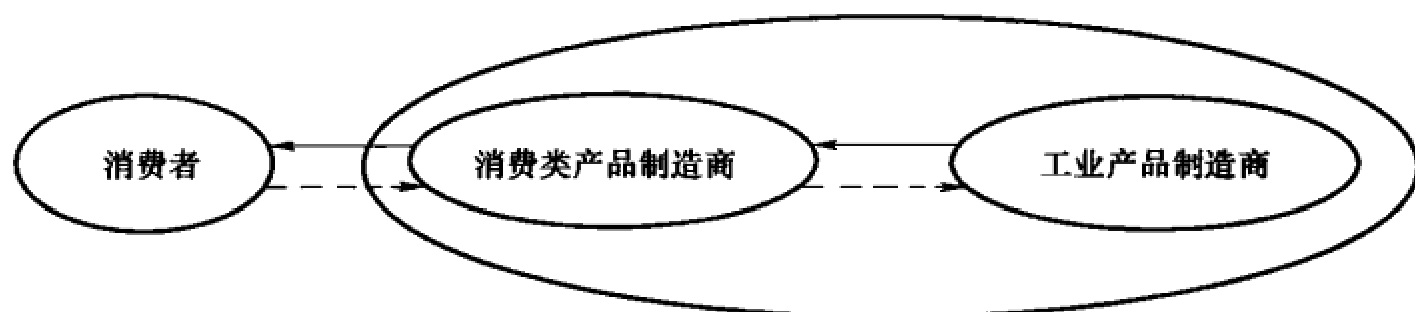


图 1.3　消费者、消费类产品制造商以及工业产品制造商之间的关系

图 1.4 所示为常规产品的制造流程。此流程同样适用于消费类产品和工业设备。它从市场研究开始，然后进入产品开发、产品设计、产品制造，最终以产品的销售结束。

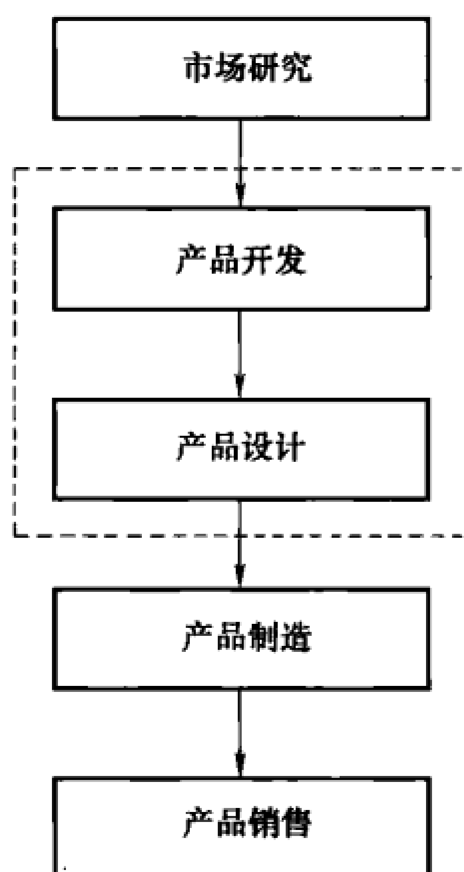


图 1.4　常规产品的制造流程

1.2　产品制造方法与模式的历史变迁

现代机器产品制造方法的变迁是随着工业发展而进行的。图 1.5 所示为产品制造模式的历史演变过程。图 1.6 所示为产品制造方法的发展趋势。

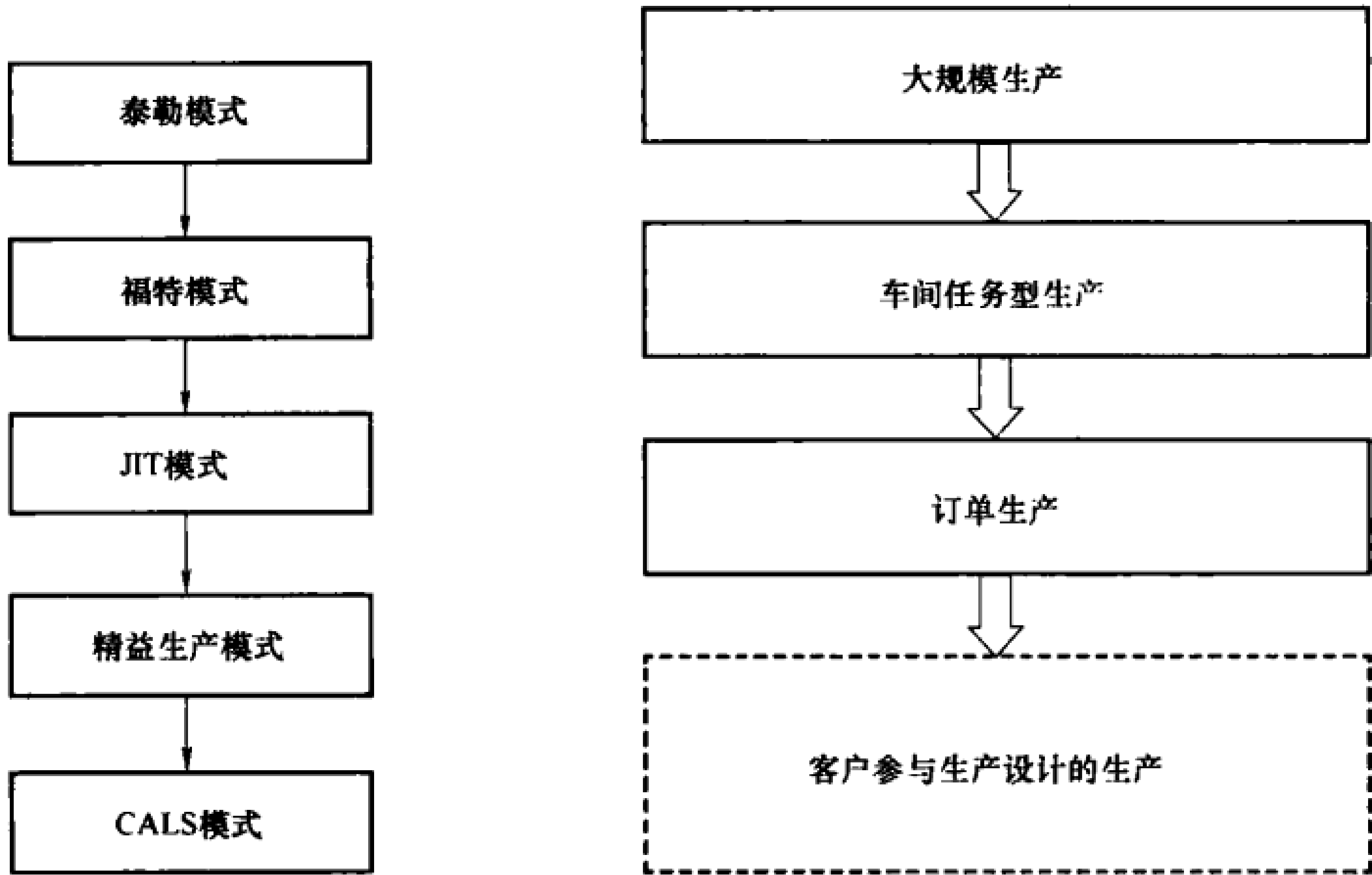


图 1.5　产品制造模式的历史演变过程

图 1.6　产品制造方法的发展趋势

19 世纪末期，Frederick Winslow Taylor（1856—1915）发明了一种特别关注于制造业经营效率的管理方法，即泰勒模式。美国汽车制造商基于泰勒模式制订了福特模式，该模式使制造商们能够以更低的制造成本生产出大量的产品，让普通大众得以拥有自己的汽车，迈向了更加富裕生活的第一步。这使得经济得以迅速发展，其他企业也随之改进了自己的制造方法。

当人们熟悉了大规模生产（Mass Production）的产品之后，出现了日趋增长的更高要求。人们希望产品更加舒适，改进更加迅速，更加符合生活的发展。为了满足迅速增长的消费需求，产品制造商们被迫改变制造方法，从有限种类的大规模生产方式转变到车间任务型（Job Shop Type Production）生产，从而制造更多种类的产品，以满足广泛的用户偏好。这种制造方法提出了以下要求：

① 迅速响应消费者需求，避免走入死角或缺乏监管，因为这样会浪费时间、能源和材料，同时还必须提高效率、降低成本，在尽可能短的时间内开发出高质量的产品。

② 开发消费者需要的新产品，而不是只改进当前产品。这些需求使生产模式发生了一定的变化。在大规模生产时期，生产商或销售商出售已生产出的产品，而现在则要更加关注于满足客户需求，变成了制造“将要销售的产品”。能解决此类问题的生产方法称为“准时生产方式（Just In Time，JIT）”，它要求制造所需的零件要及时地供应到位，可以有效地应用到车间任务型生产方法中（第 2.1 节将详细介绍这一方法）。在 20 世纪 80 年代后半期，这种方法在美国被系统地提出，称为“精益生产方法（Lean Production Method，LPM）”。它可以在保持生产和资金运行效率的前提下，有效地满足客户对产品的波动性需求。现在，准时生产方式和精益生产方法已广泛应用于全世界的制造业。在 20 世纪 90 年代后半期，人们基于 CALS（Continuous Acquisition and Lifecycle Support，持续采办与全生命周期支持）提出了一种新的生产方法。它用计算机处理与产品的全生命周期相关的所有数据，这使得实时的数据交换与决策变为现实，不断提高的信息处理技术使得这种方法更为有效。CALS 最初的含义也已被“光速商务（Commerce at Light Speed）”所取代。

现在，车间任务型生产已逐渐过时，取而代之的是支持产品订购的制造模式。在前一种方式中，消费者只能在制造商预先准备好的有限种产品中进行选择，而后一种方式能在一定程度上满足消费者特定或更具体的需求。未来的制造业一定会以某种方式在产品的设计过程中整合用户需求，以更大程度地满足用户需求，实现一定程度的用户—制造商协同制造模式。

除了前面提到的两个基本要求——响应用户需求和开发新产品外，以下两个要求也逐渐得到了重视：

① 公众逐渐开始关注产品对自然环境的不利影响，自然资源的逐渐枯竭也要求我们必须考虑产品的生命周期、零部件及材料的回收等问题。

② 人类的精神以及物质需求要求企业设计并制造出更加能符合人类感情及精神需求的产品。

在理想状态下，现代产品制造业应该满足以上提到的 4 点要求。这就需要有能够判断以上 4 个需求是否得到满足的标准。

图 1.6 描绘了近 100 年内产品制造模式的变化。在此期间，企业根据特定的标准制订了关于产品开发的竞争策略。受此期间变化的影响，产品制造标准也有所进展，变得更加复杂。以下是过去半个世纪产品设计标准的主要发展趋势：

① 单一目标函数的优化，如在产品性能和质量的约束下，缩短产品上市时间并降低成本。

② 由于单一目标函数的改进有可能会引起产品其他特征的下降，企业意识到了产品特征之间冲突的重要性，从而在广泛的层面上采用了更为灵活的优化策略。

③ 把与自然环境、资源以及回收等相关因素的影响程度纳入到了产品评价标准中。

④ 逐渐意识到在产品设计评价中，需要把产品使用时的舒适度及艺术性考虑在内。

思考题

1.1 现代制造业早期为什么需要大规模生产？大规模生产方法是如何实施的？

1.2 讨论车间任务型生产方法存在的问题及解决这些问题的方法。

第2章　产品制造过程中的评价标准和优化基础

本章主要介绍一些关键的优化技术及评价所需考虑因素的适当性和质量的标准。本章首先参考特定产品制造模式及这些模式的变迁，解释所提出的基本评价标准及特征，然后用那些在当前及将来都能与复杂的评估技术相融合，改进产品制造的主观特征解释满意度函数的使用方法，继而讨论评价标准与优化过程的关系，特别区分了设计过程与优化过程，接着介绍应用于工业活动的优化技术的发展状况，探究那些存在复杂冲突关系的评价标准，并说明了如何用多目标帕累托最优解（Multiobjective Pareto Optimum Solution）来处理产品优化的众多细节问题，最后讨论了如何用系统优化方法中的帕累托最优化解集最大限度地改进产品的设计与制造过程。

2.1　产品制造过程中的评价项和评价标准

为了得到最优的产品设计与制造方案，首先要根据特定产品的具体情况定义产品制造的评价项与评价标准。下面讨论这些最基本的评价项和评价标准。

2.1.1　产品质量和性能

产品制造的目标是制造满足某种功能需要，具备某些性能、质量和特征的产品。关于产品质量，最初的标准可以分为两种：设计质量与制造工艺质量。设计质量与用户对产品的要求相对应，对于工业设备（如机床和工业机器人）来说，设计质量包括工作精度、效率、运行能量需求以及类似于此的其他性能表现；对于汽车来说，可操控性、加速度、刹车性能、燃油量、抗碰撞性能、舒适性、通用性、美观度等则是需要考虑的因素。另一方面，在生产实现预期设计质量的产品时，要考虑制造工艺质量。对于机床来说，制造工艺质量包括尺寸偏差、连接处的表面粗糙度、加工精度等。为了保证产品拥有满意的质量，制造商必须评估制造出的产品是否达到预先制订的设计规范。此处，与制造工艺相关的偏差是主要的评价因素。

消费者对所购买产品的质量要求通常表现为产品性能。例如，当把精度作为产品的性能表现时，它指用产品来实现或完成某项目标时所能达到的精确程度。效率通常用完成某项任务或操作序列所需的时间定义。我们通常认为，能更快速地完成工作的产品具有更高的效率。

2.1.2 制造成本

产品设计中另一个重要的标准是总制造成本，即实际制造产品所需各种费用的总和。结构件和部件的材料成本、加工成本、铸造和锻压成本、粉末冶金成本、焊接和装配的成本等都属于制造成本范畴。其他产品总成本内的费用包括人力费用、管理费用、广告费用等，都可以进行定量评估。某些情况下，评价标准的转化对于优化求解比较有利，如把时间转换为成本。

图 1.6 给出了大规模生产时代最重要的评价标准，即尽可能减少产品制造成本，在实现所需产品性能、保证自动化制造技术与制造工艺可行的同时缩短产品开发时间。在车间任务型生产的时代，制造商生产的产品必须在性能和成本方面具备多种组合方式，以满足客户的不同需求。这类定制产品的批量较小，大规模生产模式所能节约的成本是无法实现的。现在也提出了很多技术，用以缩减车间任务型生产的制造成本，本书也将在后续内容中介绍产品制造技术的创新成果。为了把每一项产品性能所需的制造成本缩减到最小，在产品制造过程的优化中，必须把产品每项具体性能对应的最小制造成本作为评价标准。

2.1.3 产品需求、研制周期、库存和交货期

在大规模生产时期，制造商们只是连续地生产产品，客户通常也能及时拿到所需产品。在车间任务型生产及定制生产模式下，产品的交货时间——也就是客户从订购产品到拿到产品之间的时间段——变得特别重要。客户是否能快速得到想要的产品，会在很大程度上影响到客户的满意度。能够更快地生产出定制产品的企业才能在竞争中生存并发展壮大。交货时间通常在制造之前决定，实现预定的交付计划是制造企业成功的关键所在。

研制时间与产品的交货时间之间存在着重要关系。研制时间是客户下订单之后到收到产品所需的时间，或者说是从原材料准备就绪到产品制造完成所需的时间。它对于当前的制造环境来说非常重要。为了确保能在缩短后的交付时间内交货，必须要缩短研制时间。

在当前世界各地生活水平日益提高的情况下，客户的要求和喜好不仅千差万别，而且也会随时间的推移持续变化，或突然发生变化。为了迅速适应这种变化，企业必须缩短开发周期，这样才能尽快地将其产品推向市场，并且要在减少制造成本的情况下保证或改进产品的性能需求和质量。在包括多种制造工艺的产品制造过程中，企业要减少每个阶段所用的时间，并行地开展某些工作，并把生产失误降低到最少。

图 2.1 所示为产品的生命周期，横轴和纵轴分别表示时间和需求量。产品的需求通常会随着时间的推移迅速增长，达到顶峰，然后逐渐减少。

当一个企业响应某产品的市场需求而开始制造类似产品时，产品的供给曲线包含的阶段有成长期、成熟期和衰退期。产品的需求曲线也包括这几个阶段。在

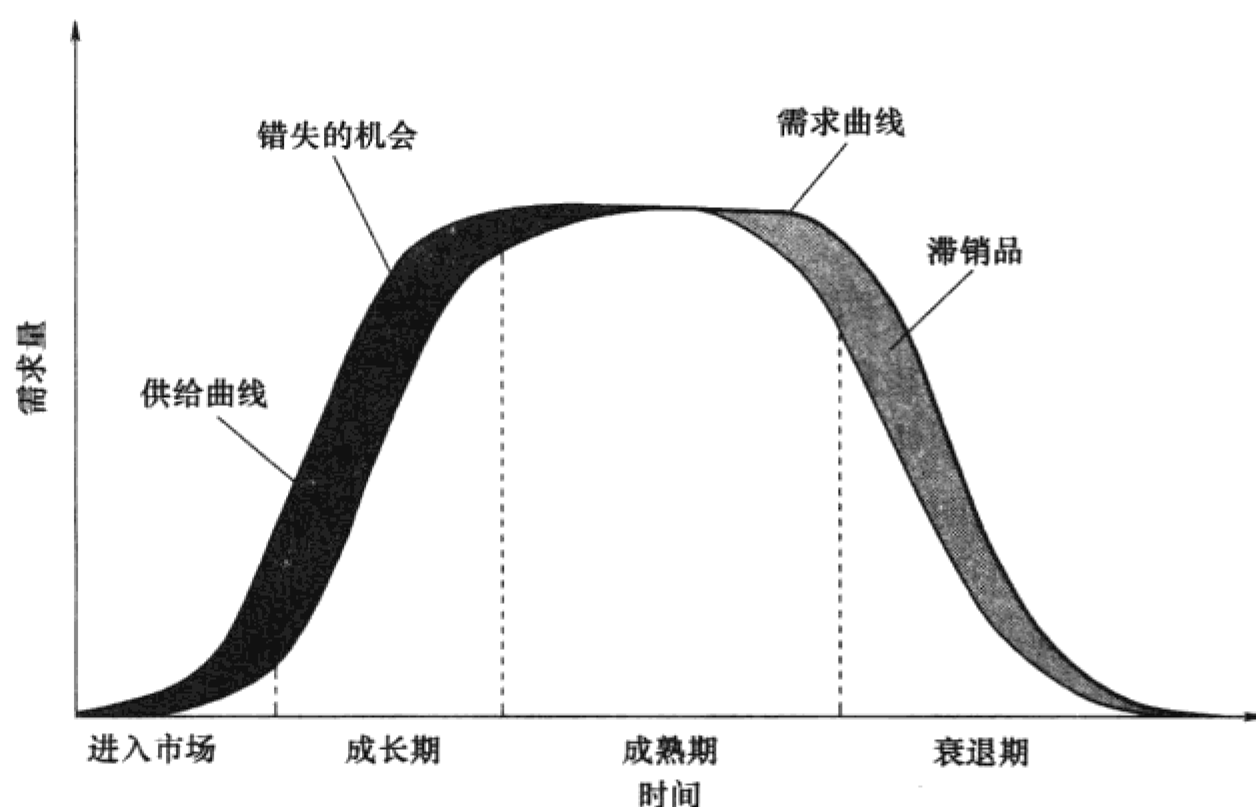


图 2.1　产品的生命周期

大部分情况下（如图 2.1 所示），供给曲线滞后于需求曲线，滞后的程度会严重影响企业利润，因为较晚进入某产品市场会导致总体销售量较低。迅速响应产品需求，可以避免由此导致的利润流失（即图 2.1 左边的阴影区域）。与此对应的右边阴影区域表示需求与供给曲线的另外一种关系：随着销量的减少，产量超过需求，货物滞销带来的成本开支属于不良影响。

需求曲线上，从成长期过渡到衰退期的时间跨度会逐年变短，这与产品种类的数量有较大关系。在车间任务型生产中，类似的时间段甚至会因产品种类的增加而变短。

为了成功生产产品，所需的零部件和材料必须及时、同时就位。因此，灵活的库存控制是必不可少的。图 2.2 所示为零部件或材料的订购与库存量的关系。当库存量降低到特定值 Q_0，就需要订购一定量的替换零件或材料，以便及时补充库存，保证生产进度。

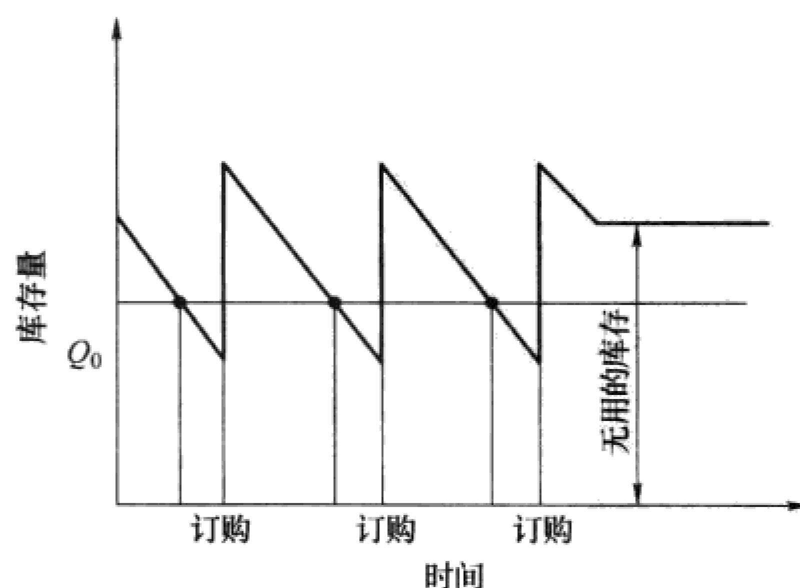


图 2.2　零部件或材料的订购与库存量的关系

随着库存水平的提高，仓储和基建支出的成本也会随之提高，但从另一方面讲，必须要避免库存缺货，因为生产的

中断会造成巨大损失。因此，在既定的零部件或材料使用状况下，最小化资金损失和最小化保持充裕库存所要付出的成本之间存在冲突。另外，过量的库存对产品制造来说是一种浪费，当库存中有用不到的零部件或材料时，更是如此。

2.1.4 生产方法相关问题

目前，生产方法主要有两种：根据库存生产和根据订单生产。在根据库存生产中，最终产品在每个零售店的数量与本地库存量相同，当需求上升时，企业才补充库存；而在根据订单生产中，企业只有在接到订单后才开始生产产品。为了缩短生产到订购的间隔时间，一些企业只在某些制造阶段维持库存量，所要维持库存的零部件或材料根据内部生产和库存需求决定。

很多产品的生产都包括多个制造环节，并且依赖于多种工艺。除非生产线平稳运行，否则就可能出现某个工艺缺少零部件的情况，这会导致前面阶段已生产零部件的堆积，并且无法将其传递到下游生产线。为了处理此类问题，人们发明了一种新的生产方法——JIT（Just In Time）生产方法，它要求精确供给每个制造环节所需的零部件数。

JIT 生产方法也称为“丰田制造方法（Toyota Manufacturing Method）”。称为“看板”的工序卡用来明确界定零部件的后续流向，从上游工艺到下游阶段，并在沿途为工艺提供可用的制造说明。这种生产方法通过以下三种途径来最小化制造过程中在材料和时间方面的损失：

① 避免过多制造某种产品，同时也要避免这种产品缺货。

② 杜绝零部件使制造过程“卡壳”的状况。

③ 最小化运输和库存损失。

在竞争激烈的产品制造业中，最小化各类损失、最大化生产效率是非常重要的评价标准。

图 2.3 所示为理想化的供应链管理（Supply Chain Management，SCM）。它描述了一个理想化的商品和信息的流动情况，这两者通过通信与配送在两相邻单元间（如零部件供应商、产品制造商，批发商、零售商和消费者）高效流动，进而把整个链条连接起来。这一概念尝试把商品和信息的流动整合起来，这样的话，JIT 生产带来的益处就可以覆盖到整个流程中关键的配送和销售环节。



图 2.3 理想化的供应链管理

根据产品与信息的流向，生产管理系统可分为两种主要类型：推进式制造和拉动式制造。推进式制造（Push Manufacturing）是计划引导型制造系统，它把生

产管理功能集中化，并把指示分派到每个制造工艺。在这种情况下，首先要确定产量，并要在制造之前计算经济批量的大小，还要在可用设备及生产能力的约束下考虑可接受的订单量、生产程序以及生产管理细节问题等。这种生产系统主要用于大规模生产。

相比之下，拉动式制造（Pull Manufacturing）是需求引导型制造系统。生产流程和生产管理的细节都根据已知需求的特定产品制订，然后尽可能高效地进行生产制造。在这种情况下，必须要避免发生诸如设备生产效率和生产过程中的库存不匹配、由于安装时间导致的生产率下降等问题。为了实现此目标，高效地开展生产制造，企业需要新的制造技术，如使用相同的设备制造不同种类的产品、使用同样的方法处理材料和信息的流动等。3.3 节中将介绍的并行工程（Concurrent Engineering）能解决以上问题。在拉动式制造中，制造信息的流动从最下游开始，然后反射到产品的订单或需求预测，要持续保证上游所有环节所需的零部件库存。JIT 生产就是典型的拉动式制造方法，该方法通常适用于车间任务型生产方式。

2.1.5　制造过程的灵活性

制造业对灵活性的要求是从大规模生产到车间任务型生产转变的结果，后者主要根据订单进行制造，而不是预先制造产品。因此，制造设备的灵活性变得日趋重要。

由传送设备把各种加工机械连接起来的生产系统称为柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）。FMS 由诸如 NC（Numerical Control）设备、加工中心、自动刀具转换设备、传送设备、灵活的工作输送系统、工序内零部件存储区域、计算机控制系统等灵活的加工机械组成。所谓的柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell，FMC）就是一个小型的 FMS。图 2.4 所示为一个由工业机器人和机床组成的 FMC，其中的机床以工业传输机器人为中心成组分布[1]。完整的 FMS 通常需要有大量的资金投入，且无法及时响应生产状况的变化，此时就需要对多个 FMC 进行灵活配置。

在柔性制造中，制造设备要能灵活地进行配置，以满足产品制造数量的大范围变化，这样才能应对产品需求的波动变化，生产出种类变化、产量不同的产品。为了满足对这类设备的需求，人们开发出了复合机床，它能同时处理多种加工工艺，同时完成多种操作和运行要求。图 2.5 所示为制造方法、灵活性和所需设备成本之间的关系。在自动化传输生产系统（也称为流水作业系统）中，工人在生产线旁工作，配合传送机械的传输速度完成产品的装配任务。这种系统比较昂贵，但如果工人的配置和任务序列设计合理，每单位时间的产量还是比较可观的。但因为工人的熟练程度各有不同，产量会受到较慢工人的工作效率约束，因此自动化传输生产系统的灵活性不高。

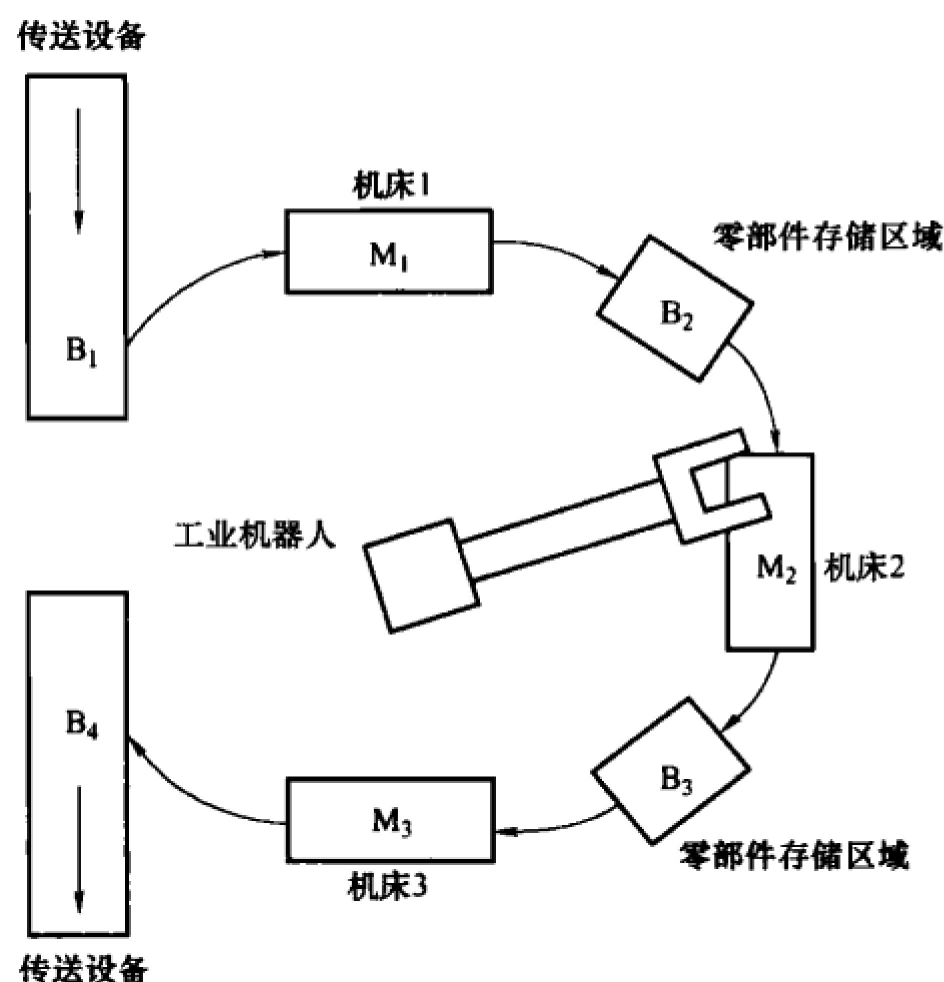


图 2.4　一个由工业机器人和机床组成的 FMC

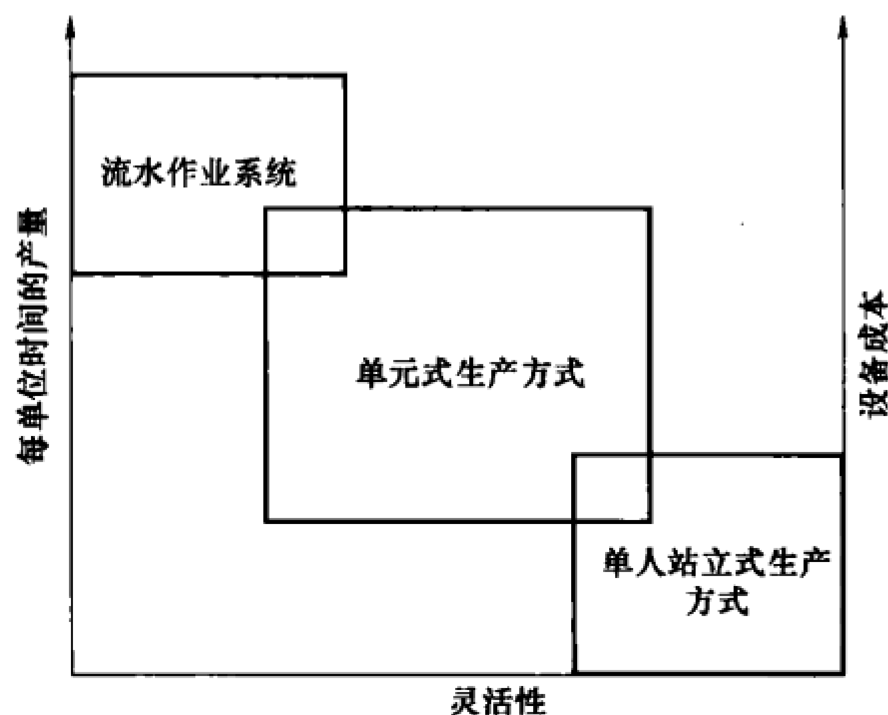


图 2.5　制造方法、灵活性和所需设备成本之间的关系

单元式生产方式把传送机械排除在生产线之外，这样就可以评估工人的熟练程度，调整两相邻工人的间隔距离，调整多个工人间重叠的工作内容。因此，生产流程中的延迟可以通过单元式生产方式降到最低。

在单人站立式工作的生产方式中，单个工人在工作空间内执行任务，就像在餐台前搭配食物一样。这类任务的完成情况由单个工人的能力决定，工人的熟练程度对制造系统的效率有直接影响。根据所要求任务的详细内容不同，这种制造

方式有较好的灵活性，设备成本也最小。为了满足车间任务型生产的需求，可以采用单元式生产方式或单人站立式生产方式，但这是不是最好的解决办法取决于所要生产的产品数量和性质。

2.1.6 加工能力

加工能力指制造过程所能保持的整体质量，它通过测量所加工工件的各种特征来进行评估。

产品必然包含各种各样的特征，这些特征对于产品的实际性能都有重要作用，因此都应该作为产品的评价因素。产品特征的多样化带来了更多的要求：材料特征的多样性、制造工艺的多样性、产品使用环境中温度和湿度的变化等等。要尽可能地避免产品在使用过程中出现由以上多样性引起的功能退化和性能下降。

在质量工程中，衡量质量的一项标准是尽可能最小化所需评估产品特征的多样性。在大规模生产中，同样的产品生产连续不断地进行，对产品特征多样性进行评估，防止特征超出特定范围非常重要。在车间任务型生产中，产品特征的多样化程度是重要的因素，产品销量主要受这一因素的影响。

公差（Tolerance）常用作评估所制造零件或工件是否在可接受范围内，被定义为可接受测量尺寸的上下限的变化。零件或产品未通过公差检测时，最好将其舍弃不用。

加工能力指工艺的一致性，通常用工件的各种特征来度量，例如所加工零件的尺寸。图2.6所示为工件特征的差异分布，通常用直方图进行描述。当分布接近正态分布时，用均值μ和标准偏差σ来描述特征的变化。标准偏差表示特征的分布范围，加工能力通常表示为$\mu \pm 3\sigma$，其宽度为6σ，也就是$\pm 3\sigma$的总范围。工件特征落在6σ之外的概率可粗略估计为0.27%。当公差等于6σ时，大约0.27%的生产产出是不满意的。

半导体制造业和其他一些产业对产品的质量要求非常高，$\pm 3\sigma$的误差范围是不可接受的，需要确定更加严格的误差范围。在美国，大约从20世纪80年代起，摩托罗拉公司发起了六西格玛（6σ，实际上是$\pm 6\sigma$）活动，以减少产品落在所要求误差范围之外的数量。通用电气和其他公司迅速响应，6σ变成了很多致力于改进产品质量项目的一个口号。在实际中，这个公差范围太过严格，因此采用了$\pm 4.5\sigma$作为标准，其结果是每百万个零件中只有大约3个是不合格的。为了提升加工能力，必须要使用那些拥有高运行精度的设备，采用更高精度的加工方法，更高质量的材料，这通常也会提升制造成本。如何在保证产品质量的同时维持或降低制造成本是非常重要的技术课题。

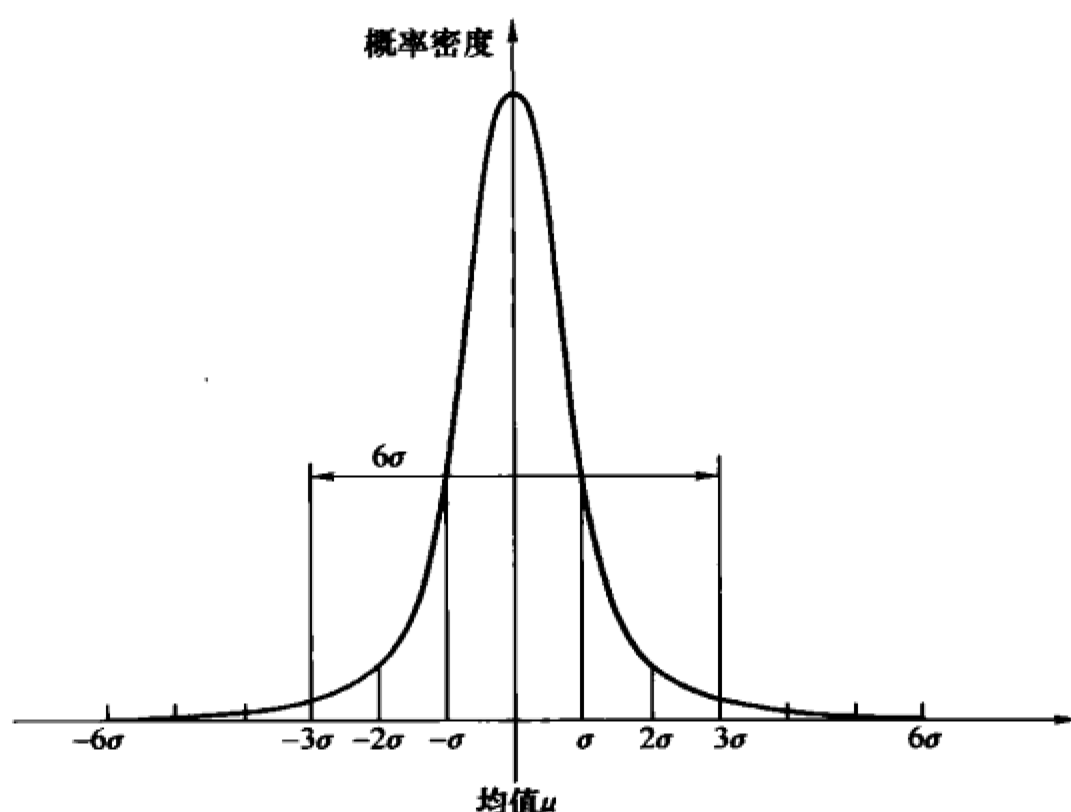


图 2.6 工件特征的差异分布

2.1.7 安全性和可靠性

安全性和可靠性是产品设计中极其重要的评价标准。如果某个非常重要的产品在服务中有比预期还高的失效率，就需要花费很多精力查找发生失效的原因，并找出如何杜绝此类事情再次发生的办法。在产品的设计过程中要充分考虑此类问题，这似乎已是一项常识，但并不是所有的人都这样认为。安全性的评价主要用于防止对用户造成伤害或使用户受伤，可靠性的评价则用来确保产品在预期时间段内正常实现其功能。用户常常会因为产品没有按照预期实现其功能而受到伤害。因此，拥有较低可靠性的系统通常也不太安全。

近年来，快速响应用户需求，缩短产品开发时间已成为头等大事。计算机系统也逐渐应用于产品设计过程，这可以使产品的相关试验次数降到最少。

在先进的大型产品的设计和制造中，大量的专业工程师通常仅在自己所在企业内相对较窄的范围内工作。在这种情况下，信息共享的不足或是协同工作中遇到的困难将会是实现企业目标最大的障碍。同样，产品的安全性和可靠性问题也日益突出，需要得到特别的关注。关于产品可靠性，具有代表性的评价标准如下：

① 可靠度：当产品在特定情况下，特定的时间段内无故障运行，提供预先设定功能的概率。

产品在 $t=0$ 时正常运行，在时间 t 处的可靠度 $R(t)$ 的定义为

$$R(t)=\Pr\{\text{在区间 } [0,\ t] \text{ 内正常运行} \mid \text{在时间 } t=0 \text{ 处正常运行}\}$$

其中，$\Pr\{A \mid B\}$ 表示 A 在条件 B 下的条件概率。当产品在 $t=0$ 时正常运行，$R(t)$ 指产品在使用阶段 $[0,\ t]$ 内无故障运行的概率。当可靠度较高时，

$R(t)$ 的值趋近于 1；当可靠度降低时，$R(t)$ 的值较小。

② 不可靠度：用 1 减去可靠度之后得到的值，也就是产品在特定时间内无法实现其预定功能的概率。

③ 可用性：产品实际运行时间与要求工作时间的比值。

④ 故障率：在特定阶段内出现故障的产品或零部件数量与正常运行的产品或零部件数量的比值。

⑤ 平均无故障时间（MTTF）：产品开始运行到故障发生所经历时间的平均值。

⑥ 维修性：恢复产品功能的概率，也就是故障发生时在特定时间限制内修复产品的情况。

⑦ 平均故障间隔时间（MTBF）：当前故障与下次故障间的平均间隔时间，包括检测故障并修复产品所需时间。

⑧ 平均修复时间（MTTR）：从故障发生到完成修复的平均所用时间，包括检测故障所用时间、从检测到故障到开始维修间隔时间、开始维修到完成修复所用时间、修复完成到产品功能恢复所用时间。

2.1.8　自然环境与自然资源

产品制造对自然环境有非常大的影响，目前已造成了大量的灾难和自然资源的枯竭。为了缓解这类问题，在产品的设计中必须考虑产品的生命周期和产品、材料的回收等问题[2]。

在大规模生产中，降低制造成本是主要的策略，那些用户最想拥有的经济型产品总是产能不足。在这种情况下，产品制造商通常会用更多的自然资源来制造产品，这样就可以尽可能多地满足客户需求。

目前，消费者和产品制造商都已意识到循环利用资源，再利用产品零件的迫切性。在先进产品制造业中，从概念设计阶段就要对这类问题详加考虑。单纯的以产品消费为目的的加工已逐渐被更加复杂、但却更具吸引力的加工取代，后者生产的产品能进行维修而不是简单地丢弃，且在不再使用时更易于回收。当这种类型的设计与制造得到普及时，长远的经济利益就会更加明显。

生命周期设计的目标是经济社会的可持续发展。产品制造商要具备最小化对环境的影响，并关注自然资源利用状况的良好商业意识。评估生命周期的典型方法包括生命周期成本（Life Cycle Costing，LCC）和生命周期评估（Life Cycle Assessment，LCA）。LCC 表示实现并保持产品既定功能的所有成本。对于简单产品来说，LCC 可表示为

$$\text{LCC} = \text{购置成本} + \text{运行成本} + \text{回收或废弃成本}$$

LCA 是用来客观量化分析产品完整的生命周期对自然环境影响的方法。完整的生命周期包括从采办自然资源到制造、运输、销售、使用、回收以及最终废

弃的所有环节。评估产品生命周期设计的相关标准可表示为

$$\Phi = \text{整体社会对产品的满意程度/产品对全球环境造成的所有负面影响} \tag{2.1}$$

也就是说，应该最大化由于成功实现产品功能带来的满意程度与产品对自然环境造成的影响和破坏之比，这样才能保持经济社会的长期活力，建立真正的可持续生活方式。

与产品生命周期相关的相关术语包括：回收（Recycle）、再利用（Reuse）、降耗（Reduce），这三者通常一起被称为3R。回收包括热能源和材料的回收利用，某些废弃材料可用作燃料，其他可回收利用的材料可再次用作其他产品的原材料。再利用指把原产品的零部件和其他组成部分用于其他产品。降耗指降低产品能耗，例如减小产品重量[⊖]、降低能源消耗、去除不必要的功能、防止产量过剩等。

在3R中，降耗拥有最高的优先权，与产品设计有最直接的关系。先进产品设计的目标是最小化能源消耗，降低对环境的影响。拥有第二优先权的是再利用，制造过程中的零部件和机械元件再利用可以节省材料和能源消耗。回收的优先权最低，它主要关注于减少对最原始自然资源的利用，实际中回收产品产生的能源消耗也是不容忽视的。当诸如金属、石油之类的材料价格上升已成为产品制造过程中的一部分成本消耗时，仍然有很多机会可以减少使得自然资源枯竭、自然环境恶化的浪费和低效。有责任心的制造商们需要实现的目标之一是减少对矿产和石化资源的使用，在设备运行和产品使用的过程中减少对环境的影响。

2.1.9　精神满意度

当前，具有合理成本的产品所提供的高端性能和可靠的质量已经超过了人们的预期要求。与产品质量相关的精神因素（如美学特征）——通常称为感性特征（Kansei Characteristic）——已成为一个显著的因素。它既能促进用户对产品的识别，也能对用户的识别作出反馈。4.2节将详细阐述感性特征。

2.2　评价标准的要求

对于在图1.6中描绘的产品制造方法的发展趋势，产品开发的竞争主要是在特定历史时期内对用户广泛专注的标准进行优化。这些标准和相应的要求已经发

⊖ 按GB3102.3—1993规定，重量是重力，“质量”含义的重量应改为质量。但考虑到本书中其易与品质含义的“质量”相混，故本书仍沿用“重量”术语。

生了巨大的变化，并在产品制造的历史过程中变得更加复杂。以下是大致的发展历程：

① 单一目标的优化，如完成某一工艺所需的时间，把制造成本控制在某个特定的范围内。

② 考虑制造过程中的冲突关系，单个目标的改善可能会降低其他方面的表现。人们在优化的过程中意识到需要探索出更宽泛、更灵活的标准。

③ 在制订产品设计标准时，需要考虑产品的制造过程、对自然环境的影响以及所消耗的自然资源。

④ 在产品设计标准中，包括舒适度和用户体验的精神满意程度。提出最大化用户满意度的要求，在传统的产品标准关注功能、性能、质量和成本的同时必须考虑美学因素。

上述③和④包括了那些难以量化评估的标准，先进的产品设计解决方案必须系统地考虑以上所有因素。

产品制造中的评价因素可定义为评价标准的特征。这些特征可以划分为两种：值越大越好的特征和值越小越好的特征。

① 值越大越好的特征。包括利润、满意度、功能、效用、精度［根据产品应用情况，静态位移、表面粗糙度、偏差和振动位移（动态）可能会变成值越小越好的特征］、效率（当用时间来评估效率时，“时间”是值越小越好的特征；当用所完成任务的量来评估效率时，“所完成任务量”是值越大越好的特征）等。

② 值越小越好的特征。包括成本、时间（完成某项工作所需的时间）、噪声、结构重量、不满意度、停机时间、运行能量需求等。

产品设计的一般目标是提供更高的满意度。满意度不仅可以表示为客观的特征（如成本和重量），也可以表示为主观的特征（如人的喜好）。对于具体问题（非系统层面），不满意度属于值越小越好的特征，必须将其降到最低；但对于设计更高级更好的产品来说，把不满意度定义为越小越好的值却是不合适的。

所谓的效用分析（Utility Analysis），通常应用于决策领域，它是一种量化表示决策者主观偏好或用户对产品、产品特征满意度的方法[3]。此处的效用指那些用来表示用户对评估对象满意度的值。为了方便起见，在后续内容中，我们将分别用 u 和 s 分别表示“效用（Utilities）”和“满意度（Satisfaction Levels）”。

产品的特征通常表示为设计变量的函数。当把效用和满意度作为设计变量函数时，我们分别将其称为效用函数和满意度函数（或偏好函数）。有很多方法可以量化表示决策者对每个产品特征的喜好，公式（2.2）即为一种表示方法[4,5]，此满意度函数的曲线如图 2.7 所示。水平轴线的 ε_{ij} 表示产品特征 j 的实际值 z_j 与目标值 z_{ij}^* 的差距；垂直轴线的 s_{ij} 表示决策者 i 对产品特征 j 的满意度，j 的值已标准化为 0 至 1 中间某值。

$$S_{ij}=\frac{1}{\pi}\arctan\ \{-a(\varepsilon_{ij}-b)\}+0.5 \tag{2.2}$$

当产品特征值越小越好时：

$$\varepsilon_{ij}=\left\{\frac{Z_{ij}-Z_{ij}^{*}}{Z_{ij}^{*}}\right\}$$

当产品特征值越大越好时：

$$\varepsilon_{ij}=\left\{\frac{Z_{ij}^{*}-Z_{ij}}{Z_{ij}^{*}}\right\}$$

上述方程中的 ε_{ij}二维地表示了产品特征的实际值与目标值之间的差距。当实际值与目标值一致时，其值为0。通过修改系数 a 和 b，可以得到不同的满意度函数曲线。较小的 a 值会产生斜度较小的函数曲线，随着 a 值的增大，函数曲线斜度相应增大。系数 b 表示满意度为 0.5 时 ε 值。把目标值处的满意度记为 s_0，当目标值已知时，就可以得到决策者满意度的具体值。根据具体研究问题的不同，当目标值已知时，满意度的值可能会接近，但总是小于1。有时，产品特征值可能会高于目标值，并且决策者希望高出越多越好，那么此时目标值处的满意度值要设定为小于1的值。通过调整系数 a 和 b 的值，决策者能够得到适用于特定产品特征的满意度曲线。

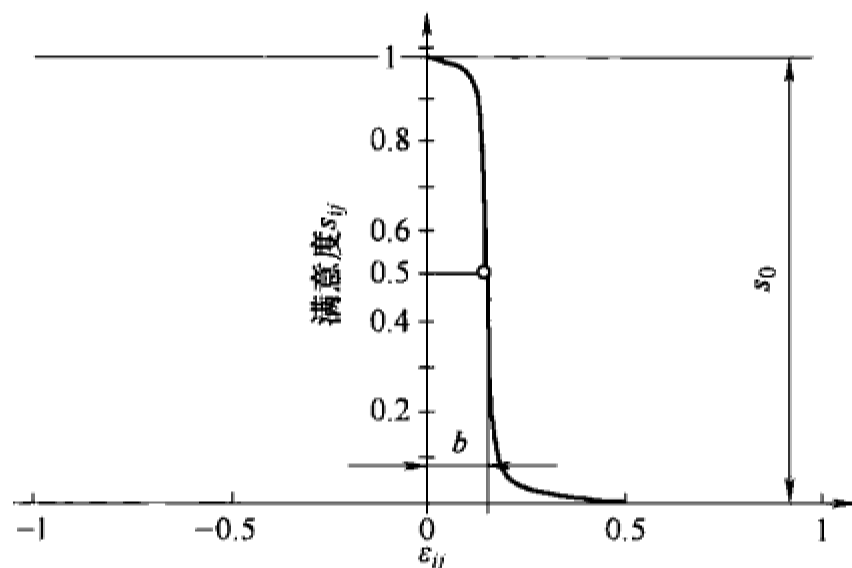


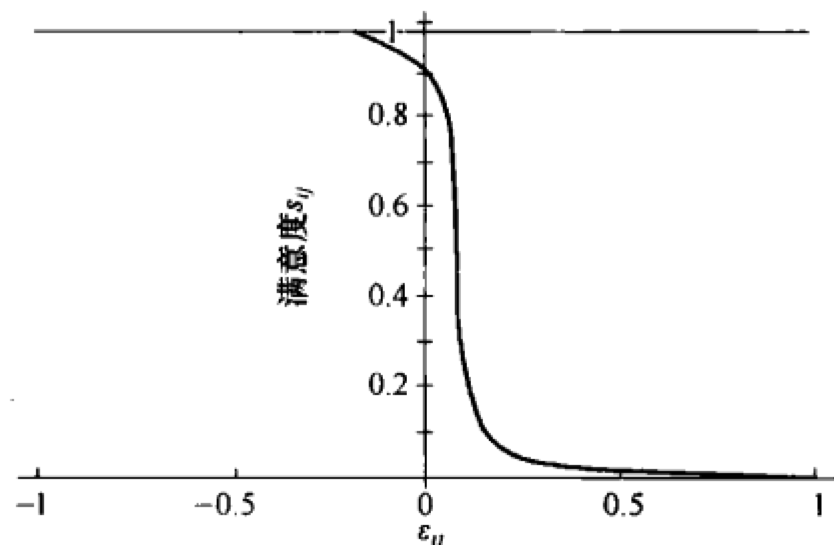
图 2.7 满意度函数曲线示例

例如产品设计与开发部的决策者会遇到最大化产品性能与最小化制造成本之间的冲突问题，这种问题就可以表示为满意度函数。当把制造成本设为定值时，产品设计部门的决策者就可以忽略掉那些不能满足最小产品特定性能的方案，这类方案的满意度较低。如果设计方案能够满足既定的性能要求，满意度会迅速上升，接近于1，此时的满意度函数曲线如图 2.8a 所示。

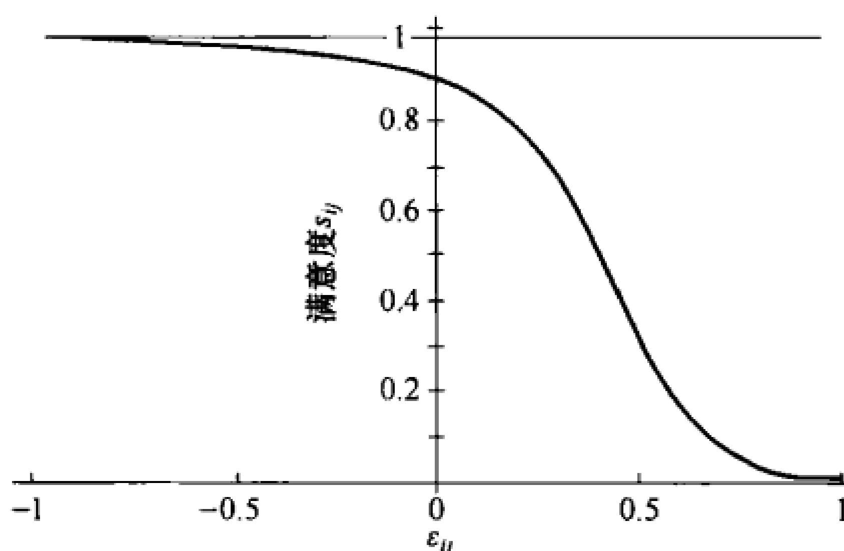
当决策目标为产品制造成本时，此特征的值越小越好，但如果在给定制造成本下产品无法达到令用户满意的性能，那些能实现更高性能的设计方案更优，即使它们对成本要求较高。此时，满意度函数曲线的斜度较小，如图 2.8b 所示。

如前所述，当前产品制造业中的很多产品特征都需要进行系统化的评价，下一节将介绍的多目标优化方法可以有效地解决这一问题。目前，系统化的评价有两种方法：使用产品固有的特征值和把产品所有值进行标准化。为了标准化产品

特征参数，需要把所有特征转换，例如成本、满意度、效用之类的特征，某些时候可能要使用满意度的倒数，即不满意度；有时要把效用函数表示为综合的产品特征，这时要使用多属性的效用函数[6]。



a) 斜度较大



b) 斜度较小

图 2.8　满意度函数曲线的类型

2.3　评价标准与优化的关系

在定义了评价标准之后，就可以基于标准找到最优解，优化方法为此提供了手段。基本的优化问题可用目标函数 f 和约束函数 g_j ($j=1, 2, \cdots, m$) 和 h_k($k=1, 2, \cdots, p$) 来为产品设计评估产品特征：

$$\begin{aligned} &f \rightarrow \text{minimize or maximize} \\ &g_j \leqslant 0, \quad j=1, 2, \cdots, m \\ &h_k = 0, \quad k=1, 2, \cdots, p \end{aligned} \tag{2.3}$$

f、g_j($j=1, 2, \cdots, m$) 和 h_k($k=1, 2, \cdots, p$) 是设计变量 d_i($i=1, 2, \cdots, n$)

的函数。通过求解以上优化问题可以确定设计变量，它通常以向量的形式表示为

$$\boldsymbol{d} = [d_1, d_2, \cdots, d_n]^{\mathrm{T}}$$

从最大化利润相关的评价因素中选择一项。作为目标函数 f，如重要的商业策略的实现、获得竞争性优势等，约束条件是那些必须得到满足的评价因素。目标函数 f 可以根据需要表示为最大或最小的目标值（如把 f 定义为 $-f$ 或 $1/f$）。

在设定好设计变量值以后，需要获取产品特征、性能、成本之类的值，这些称为正问题（Forward Problem）；而设法获取满足既定特征、性能、成本之类的设计变量值的问题称为逆问题（Inverse Problem）。设计优化就是一种逆问题。

优化问题及相关公式中用到的术语和符号为。目标函数 f 和约束函数 g_j、h_k。在公式（2.3）中，通常把可以量化处理的约束函数放在等式左边，0 放在右边。g_j 是不等式约束条件的约束函数，h_k 是等式约束条件的约束函数。

侧约束：设计变量的上、下约束。尺寸约束是典型的侧约束。

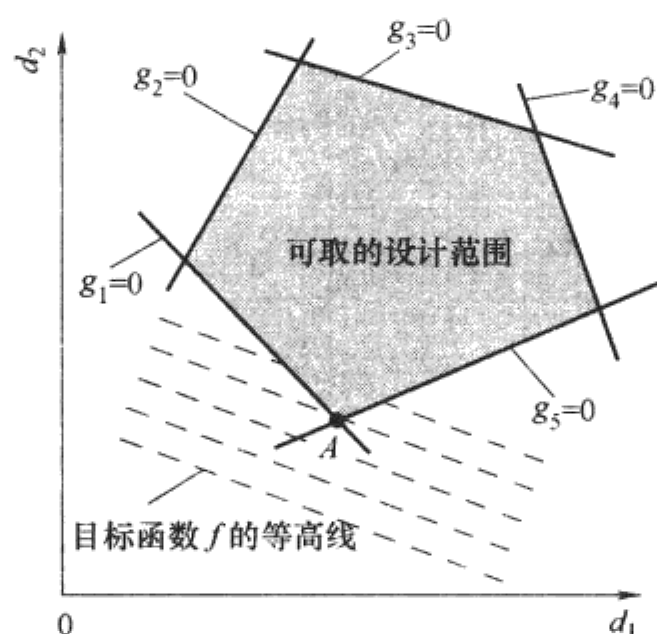
设计变量：d_i 根据问题类型定义，另外还需要的术语是“决策变量”，它指需要决策者确定的变量。

状态变量：优化目标所要达到目标的特征化表示，例如位移、应力、自然频率等。

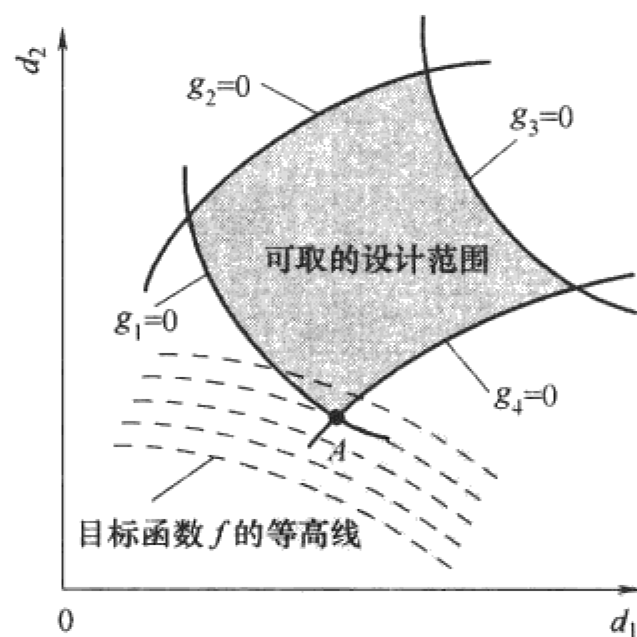
设计变量空间：坐标轴空间内设计变量的可取范围。

目标函数空间：坐标轴空间内目标函数的可取范围。

图 2.9 所示为设计变量空间的简单示例。图 2.9a 所示为一个线性优化问题（线性规划问题），目标函数和约束函数都是设计变量的线性函数。阴影区域就是满足所有约束条件时的可取设计范围。虚线表示目标函数的等高线，当趋近于坐标原点时，它具有较小值，A 点即是最优解。



a) 线性优化问题



b) 非线性优化问题

图 2.9　设计变量空间的简单示例

多目标函数和约束函数都是设计变量的非线性函数，对应的优化问题称为非

线性优化问题（非线性规划问题）。图 2.9b 所示为一个简单的非线性优化问题，目标函数和约束函数都是设计变量的非线性函数。阴影区域表示约束条件定义的可取设计范围。虚线表示目标函数的等高线，当接近于坐标原点时，它拥有较小的值，A 点即是最优解。第 7.2 节将介绍更复杂的非线性优化问题。

图 2.9 所示为最简单的优化问题，能够很容易地得出最优解。使用优化技术最重要的问题在于如何描述问题。这需要花费很多时间，并要详细考虑问题的基本面。

优化技术与程序已广泛应用于产品制造的多个领域和问题的求解，其在工业活动中的应用状况如图 2.10 所示。在应用优化技术之前，需要尝试分别对产品设计与制造的所有流程阶段进行改进。随着时间和改进次数的累积，产品的制造质量和效率会有所提升，但这种方式终究无法得到真正的优化解。因此，优化技术对于寻求更优解显得十分重要，但在广泛应用之前，需要在某些专业领域进行尝试。当明确了优化技术与应用领域的特定关系之后，就可以把优化技术广泛应用于各个领域了。根据求解问题的不同，所谓的多学科优化仍是局部的优化。对于那些不能通过简单的局部优化求解的问题而言，最优解不完全可靠。因此，人们开始逐渐关注全局优化的重要性。

在很多情况下，产品设计通常要求最小化制造成本。但在实际情况中，这种降低成本的方法不可避免地会引起产品性能的下降。某些特定的产品性能必须尽可能地高，产品制造成本必然会相应地提升。另外，当设定好约束的上下限时，也就设定了最优解的范围，但在实际中，设定约束的上下限是很困难的，特别是当某些因素不明显时。在这种情况下，用若干包含上下限的目标函数来描述的优化问题通常称为“多目标优化问题”[7]。

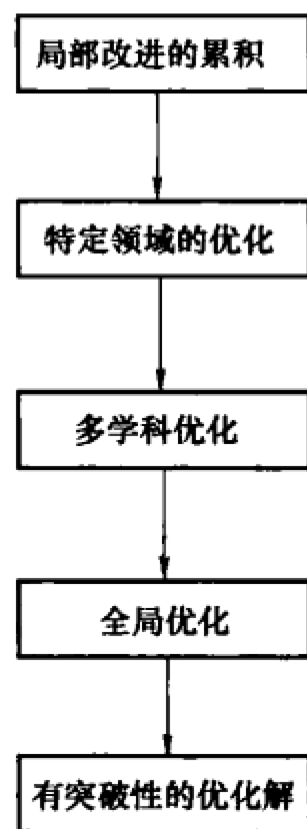


图 2.10　优化技术在工业活动中的应用状况

当存在两个目标函数，且函数值越小越好时，多目标函数的优化目标可表示为

$$f=[f_1, f_2] \rightarrow \text{minimize} \tag{2.4}$$

例如某产品设计师寻求一个最优解，保证在实际的制造过程中以最小的制造成本实现较高的产品性能，其实这两个要求本身就存在着矛盾。图 2.11 所示为最大化产品性能与最小化制造成本之间的关系[8]。如果分别用 f_1 和 f_2 表示产品性能和制造成本，上述多目标优化公式就变为

$$f\ [-f_1, f_2] \rightarrow \text{minimize} \tag{2.5}$$

图 2.11 是多目标函数坐标空间中的一个目标函数空间。图中的阴影区域是

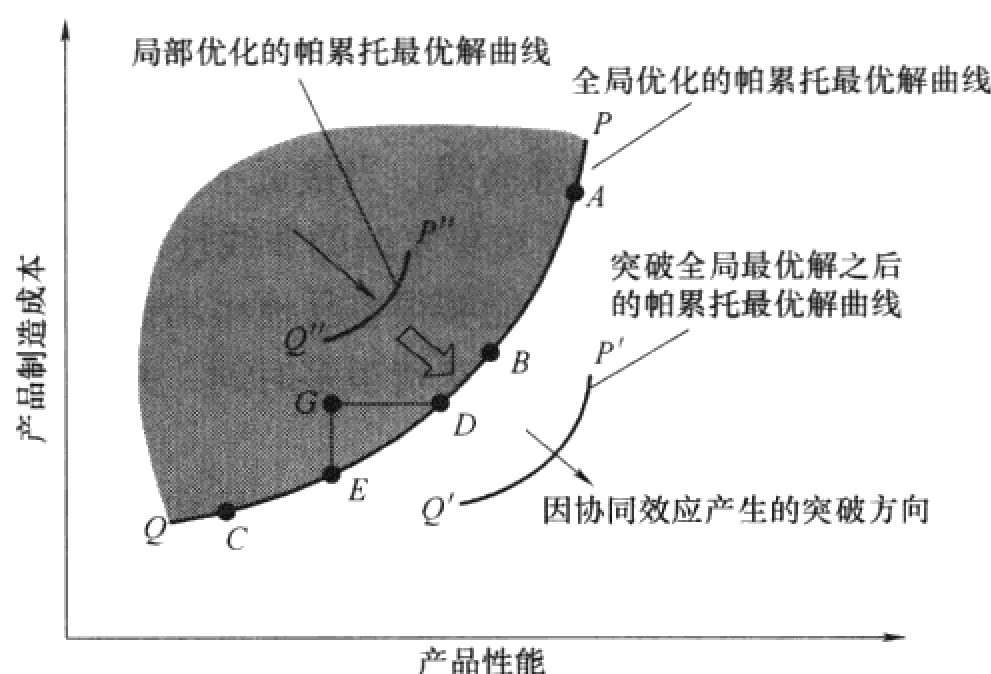


图 2.11 最大化产品性能与最小化制造成本之间的关系

利用当前知识和技术可实现的目标，曲线 *PQ* 是产品性能和制造成本两个目标函数的帕累托最优解集。

帕累托最优解集是一个包含可选解的集合，在这些解之外没有能够在不降低其他目标的前提下的更优解。“帕累托”一词来源于意大利经济学家 V. Pareto (1848—1923) 的名字。他提出了一个概念：利用现实中可用的资源有效地制造产品，并有效地分配所加工产品时，当某人的产品或资源分配改变时，他的满意度会升高，其他人的满意度则不可避免地降低[9]。帕累托最优解集也被称为“非劣解集”，但在工程优化领域，帕累托最优解集一词的使用更为广泛。

图 2.11 所示的帕累托最优解集是最优解的备选方案之一。图中曲线（当有三个目标函数时，为曲面）表示的解有效，因为它从更广泛的角度表示了最优解的特征。设计师们总是沿着可用设计范围内的箭头方向寻求最优解。在帕累托最优解曲线 *PQ* 中的 *A*、*B*、*C* 三点中，*A* 点处的解提供了最为出色的产品性能，但对制造成本的要求较高；*C* 点处的解拥有最低的制造成本，但产品性能差强人意；而 *B* 点处的解既保证了低加工成本，又提供了较好的产品性能。现实中所用的最优解要在制造商考虑产品性能的优先程度之后才能确定。

设计师通常会在帕累托最优解曲线上来寻求实际设计的解决方案。虽然局部优化能产生位于可用设计范围内 *P''Q''* 曲线上的解，但这些解离帕累托最优解曲线上的最优解太远，所以 *PQ* 曲线的全局解较难通过局部优化的累积而获得。例如可用设计范围内 *G* 点处的解就差于曲线 *DE* 上的所有解，所以不能将其作为设计解。

上述内容是在全局帕累托最优解曲线中寻求设计最优解的过程，它是实际产品设计与制造中非常重要的内容。由于市场竞争的存在，只有制造更能吸引消费者的产品，企业才能赢得更多的市场份额。在全局范围内获取帕累托最优解通常是产品设计与开发至关重要的步骤。

图 2.11 即是产品设计的最优化问题中产品性能和制造成本的关系图。在价值工程（价值分析，Value Analysis，VA）中，产品的“价值”表示为用户所需的“功能”对产品制造成本的比值，即

$$价值 = 功能/成本 \tag{2.6}$$

其中，“功能”通常包括除了成本之外的产品性能、质量以及运行因素等。当执行价值分析时，首先要确定那些具有更高“价值”的产品。

图 2.11 所示的帕累托最优解集非常有用，它不仅能表示出具体的解，还能可视化、量化地表示出最优解的范围，因为 PQ 曲线本身就是备选最优解的集合。通过观察整条帕累托最优解曲线，我们可以清晰地看出存在冲突的目标函数之间的关系，并比较两函数的差异。单独精确地判断某个解的价值是不现实的，通过对比相关的可选解集，可以确定并证实特定可用解的质量。

在产品制造系统的优化过程中，最初的目标是获取诸如图 2.11 所示的 PQ 曲线，它是解的集合，称为全局最优解。在得到这些解之后，需要进一步搜寻更优解，例如那些在 $P'Q'$ 曲线上的解，这些解是 PQ 曲线之外的重要突破解[10]。在既定的市场竞争之下，必须要寻求产品设计和制造技术的优化解。由于能提供更好的客户价值的精良产品的出现，当前成功的产品可能会迅速丧失其吸引力。仅仅持续改进产品设计与制造系统根本无法提升那些受过良好教育以及老客户的满意度。

当前，仅仅通过人力是无法得到产品设计与制造系统的最优解的。策略、系统化概念、包含有强大计算与信息处理能力的工具的环境以及新技术都是必不可少的因素。后面的章节将详细讨论这些概念和技术。

思考题

2.1 对于特定产品，例如汽车，讨论消费者购买此产品时需要评估的性能、质量和成本因素。如果你是产品设计师，在设计产品时最重要的性能、质量和制造成本有哪些？

2.2 以产品制造成本为例，讨论每一项成本与相关的产品特征之间的关系，例如结构材料成本与结构的重量的关系、结构材料成本与结构刚度的关系、接合面的加工成本与产品运行精度或连接刚度之间的关系等。

2.3 对于拥有较短生命周期的产品，把过量的库存视为一种浪费，讨论最小化过量库存的产品制造策略。

2.4 当评估各种制造过程时，讨论加工能力的重要性。

2.5 为什么需要在产品设计的早期阶段考虑产品生命周期因素？

2.6 对于某产品，如果购买时需要考虑的满意度不仅包括产品性能和质量，

还包括心理满意度，如令人赏心悦目的美学特征和舒适感。讨论产品性能/质量和心理满意度之间的关系。

2.7　列出 10 个值越大越好的产品特征，以及 10 个值越小越好的产品特征。

2.8　列出 10 组相互冲突的特征，并讨论每组中能产生最好产品特征的设计变量。

2.9　为什么产品制造过程越先进、越复杂，产品设计与制造系统的评价标准数量就越多？

2.10　为什么必须用多目标优化程序来优化产品设计？

2.11　对于高效的车间任务型生产模式，为什么加工设备的灵活性是必须要考虑的因素？

参考文献

1. Hitomi K, Yoshimura M (1986) Operations scheduling for work transportation by industrial robots in automated manufacturing systems. Material flow, 3:131–39
2. Brisssaud D, Tichkiewitch S, Zwolinski P (eds) (2006) Innovation in life cycle engineering and sustainable development, Springer, p111
3. Keeney RL, Raiffa H (1993) Decisions with multiple objectives. Cambridge University Press, p131
4. Yoshimura M, Kondo H (1997) Group decision making in product design and manufacturing. In: Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, September, Sacramento, California:1–7
5. Yoshimura M, Kondo H (1996) Product design based on concurrent processing of design and manufacturing information by utility analysis. International Journal of Concurrent Engineering: Research and Applications, 4(4):379-388
6. Keeney RL, Raiffa H (1993) Decisions with multiple objectives. Cambridge University Press, p219
7. Cohon, LL (1978) Multiobjective programming and planning. Academic Press, p220
8. Yoshimura M (1993) Concurrent optimization of product design and manufacture. In: Parsaei HR, Sullivan WG (eds) Concurrent engineering - - contemporary issues and modern design tools, Chapman & Hall:159–83
9. Samuelson, PA, Nordhaus WD (1989) Economics. McGraw-Hill
10. Yoshimura M, Kimura A (1994) Evolutional optimization of product design based on concurrent processing of design and manufacturing information. In: Proceedings of the Fifth /USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (AIAA-94-4299-CP), Part1, Sept.:434-442

第3章 产品制造的创新技术

产品设计与制造的有效创新取决于对前沿思想的理解程度。本章主要介绍产品设计与制造创新的基本概念和策略，包括概念设计、并行工程（Concurrent Engineering）和协同技术（Collaboration）等。并行工程是一个基本概念，它利用当前的知识和技术来辅助相关人员寻求全局化最优解。如果使用得当的话，它可以最小化制造加工时间，也有助于搜索，既能控制制造成本，又能改进产品性能的全局最优解集。协同技术是另外一项基本技术，越来越多地用于突破已有的全局最优解集，在更宽广的范围内灵活配置一系列知识与技术。但成功的协同要求必须满足某些条件，本章对此进行了阐述。

3.1 产品的多种选优过程

在用传统方法、程序或利用可用技术和知识建立的方法框架来搜寻更为有效的解集时，很难得出真正的全局最优解（Global Optimal Solution）或突破性的方案。此时就要在概念或初步设计阶段采用新的策略，这些策略的实施必须考虑必要的产品制造环节。只有利用那些搜寻更优解的具体目标，才能建立这些策略。如第2章所述，可用设计的最宽范围是至关重要的，通过搜集尽可能多的、与所开发产品相关的知识和信息来建立这一范围，最后从最宽可用解集中选出最优解[1]。一定要避免使用自动、僵硬或机械化的公式表达优化问题，因为这样做必将会约束求解结果，也会影响到最终的全局最优解。

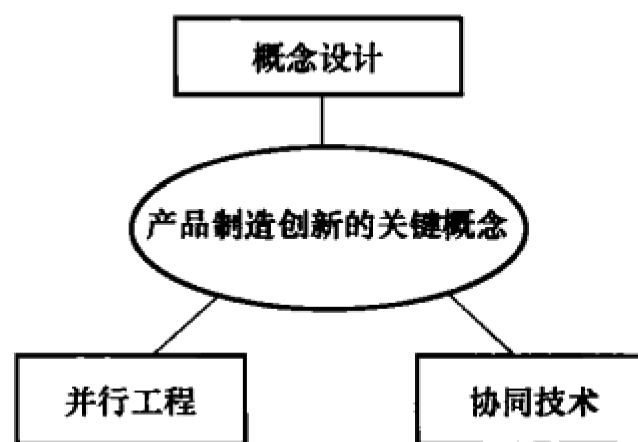


图3.1 产品制造创新的关键概念

图3.1所示为产品制造创新的三个主要概念：概念设计、并行工程和协同技术。下面将分别解释这三个概念。

3.2 概念设计阶段的创意产生

产品设计师通常根据以往经验和市场上现有产品的知识来设计新产品。但是

这会阻碍新方法的实施，有一定的局限性。新方法能实现最大可能性的设计，不仅包括产品设计，也包括制造和其他有可能促成产品设计成功的因素。同样，对于制造方法来说，传统的技术通常只具有有限的灵活性。例如当尝试改进制造能力时，自动化和计算机辅助技术只能单独应用于某些零部件的生产，以实现逐步的改进，却无法应用于更广的范围，革命性地生产一个最优产品。为了创造自由的设计环境，以便能够利用高性能产品设计、生产的优势，整个设计优化需要从简化或抽象的目标开始[2,3]。图 3.2 所示为在展开优化程序之前，基于简化目标或理想化目标开始优化设计的流程。

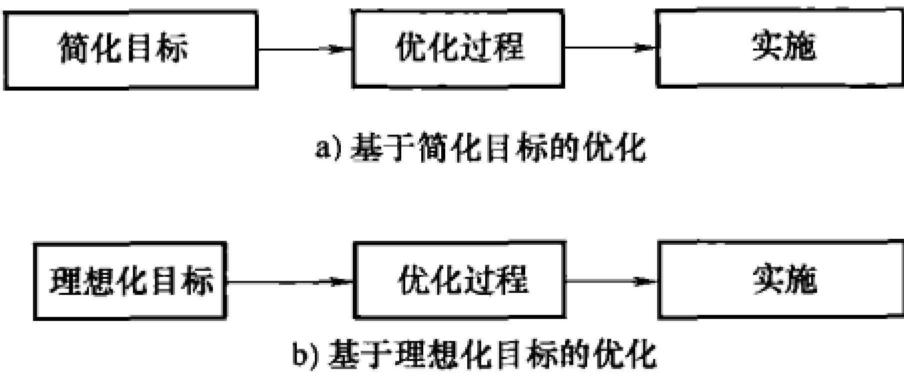


图 3.2　基于简化目标或理想化目标开始优化设计的流程

为了获取更优的设计解，必须要尽最大可能排除先入之见，还要创造能包容更宽范围可用解的条件。为了在这种情况下制订出设计策略，提出设计概念，需要平等地考虑宽广范围内的所有可用解。用来求解设计方案的方法开始于概念设计阶段，专注于产品制造相关问题。它应用了并行工程和协同技术的基本原则，下面将对此进行介绍。

3.3　并行工程

图 3.3 所示为在市场上销售的传统产品的制造流程：研究与开发、产品设计、制造和销售。在企业内，这些步骤通常由相应的某个部门完成，每个部门通常根据从制造流程上游得到的信息制订具体的决策。这些部门都积极探索、实践各种各样的方法，以提高生产效率。目前，对于改进效率低下的产品设计与制造过程，常用的方法是为各个部门都引入计算机辅助技术。这些技术包括计算机辅助设计（Computer-Aided Design，CAD）、计算机辅助制造（Computer-Aided Manufacturing，CAM）、计算机辅助工艺设计（Computer-Aided Process Planning，CAPP）、计算机辅助规划（Computer-Aided Planning，CAP）、计算机辅助测试（Computer-Aided Testing，CAT）等[3,4]。另外，为了保障产品设计与制造过程中

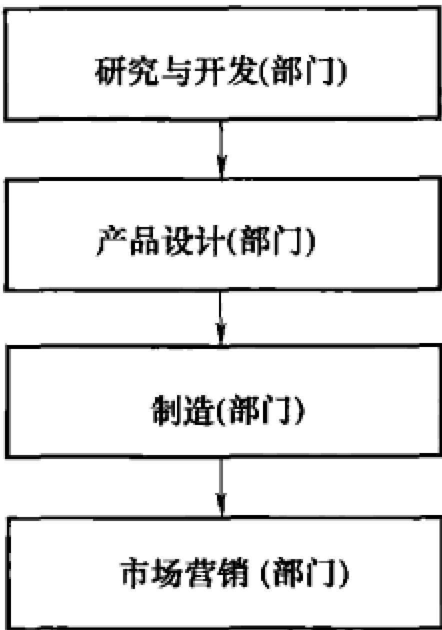


图 3.3　在市场上销售的传统产品的制造流程

的信息和材料的畅通传输，尽可能地以自动化、集成化的方式完成各种生产任务，通常还要用到计算机集成制造技术（Computer-Integrated Manufacturing, CIM）[5,6]。系统集成的特征和所能带来的效益取决于企业的具体目标。无论所生产的产品是什么，系统组织框架通常都是相同的，但系统组成部分之间配置的自动化连接的细节、提高信息和材料传输的方式却随 CIM 技术的集成程度而有所差异。图 3.4 所示为 3 个层级部门（产品设计部门、制造部门、市场营销部门）间理想的单向决策流程。CIM 技术的作用就是使这些过程以自动化、顺畅的方式进行。

在如图 3.4 所示的单向决策流程中，上游部门所做决策的实施需要各种各样的条件和实施细节，这些都将成为下游部门决策的约束条件。例如在产品细节设计过后制订决策，以降低产品的制造成本，这样的决策可能是无效的，因为产品的设计本身就在很大程度上决定了其制造成本。在刚性的有序制造流程中，在产品设计阶段之后，几乎无法降低产品的制造成本，例如当制造方法和细节都已确定时，再在工艺设计阶段进行优化。各部门之间制订决策的条件可能会相互冲突，且这类问题不能由刚性的有序制造流程解决。此外，严格的序列方法非常不适用于当前经营趋势中的产品设计和生产过程，因为现在注重的是产品的快速流通和缩短上市时间。

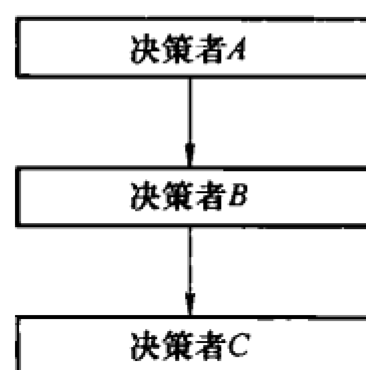


图 3.4　单向决策流程

如上所述，常见的产品制造流程都包含有单向的步骤序列，如产品开发—产品设计—制造—销售。这些步骤都由与其对应的部门完成，这些部门间存在一定的层级关系。在每个部门中，获得更优决策结果的流程都受到它所拥有权利的约束。然而，在如图 3.3 所示的系统决策过程中，上游的决策因素会成为下游决策的约束条件，可用的决策空间也会相应地变窄。因此，单向有序的决策过程很少能产生出全局最优设计解。

相对于单向有序决策过程，图 3.5 所示为基于并行工程概念的决策过程，每个部门相关的主要设计因素都在产品制造系统的上游，通过并行或相互协作的方式进行决策。

日本企业在开发新产品时，诸如研究与开发、产品设计、制造、营销等各部门通常都会抽调人员形成一个团队，讨论关于所开发产品的设计与制造相关的一系列问题。但他们的重点并不是并行地开展相关活动，在此阶段也很少用到计算机辅助系统。在西方国家，相互关联的部门间的交流少得可怜。但在 1988 年左右，他们开始使用计算机辅助系统，并提出了并行工程的概念，这一概念在美国风靡一时。并行工程也称为同步工程（Simultaneous Engineering），其中关于产品制造的决策都是在相互协调的前提下制订的，如图 3.5 所示。从产品的概念设计

阶段开始，相关人员并行地讨论设计方案，所有部门的专家在相互协调的前提下制订决策。

并行工程的概念和方法已在各类书籍和学术论文中得到了广泛的探讨，这些书籍和论文也阐明了并行工程带来的实际效益[7-10]。

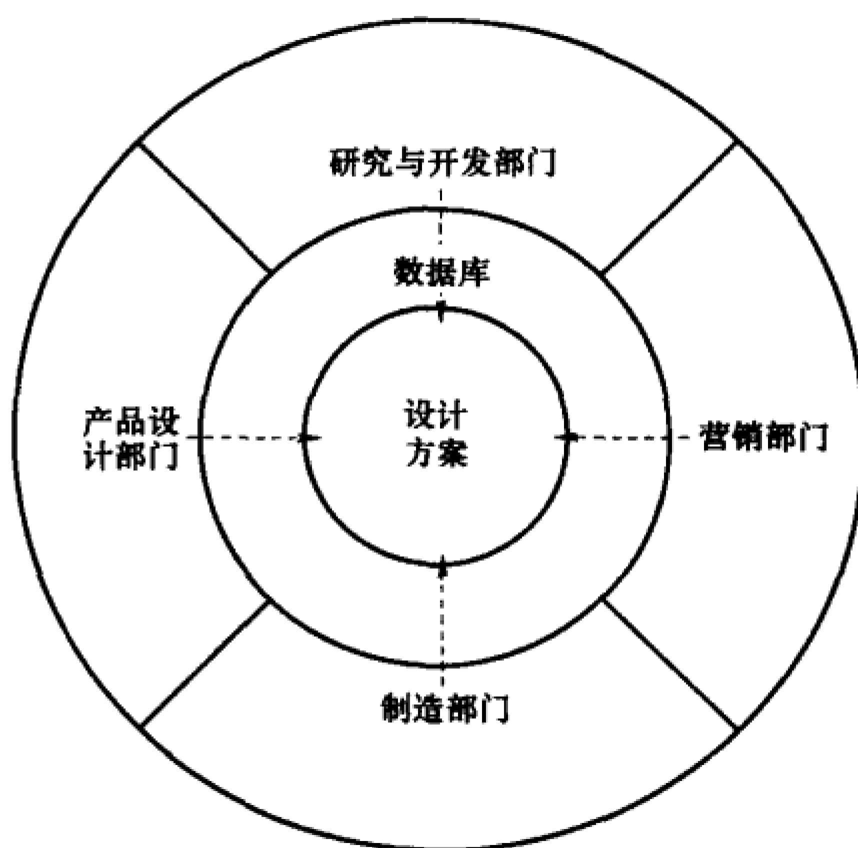


图 3.5 基于并行工程概念的决策过程

在实际的应用中，为了尽可能地扩大并行工程带来的益处，必须要使用各种各样的优化技术。图 3.6 所示为在产品设计过程中应用并行工程的基本流程。首先公正地收集各种各样需要评价的因素和设计变量，所要收集的内容一般都是根据经验决定的；其次系统地分析所有因素间的相互关系，建立适当的优化程序，以寻求全局最优解。基于并行工程的优化称为并行优化（Cncurrent Optimization）。

针对产品制造和生命周期中的某个因素，人们通常会使用诸如面向制造的设计（Design for Manufacturing）[11]、面向装配的设计（Design for Assembly）、面向维护的设计（Design for Maintenance）、面向销量的设计（Design for Distribution）、面向产品质量的设计（Design for Quality）、面向环境的设计（Design for Environment）和可靠性设计（Design for Reliability）之类的术语，这些统称为面向 X 的设计（Design for X）。X 表示那些在最早期的产品设计阶段受到并行和协作式决策的因素。面向生命周期的设计（Design for Lifecycle）和生命周期设计（Lifecycle Design）都用来表示那些必须考虑产品整个生命周期的设计。

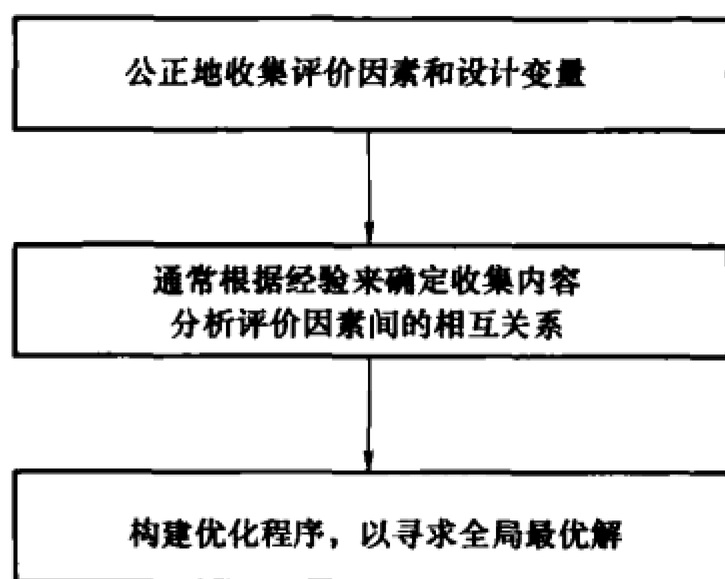
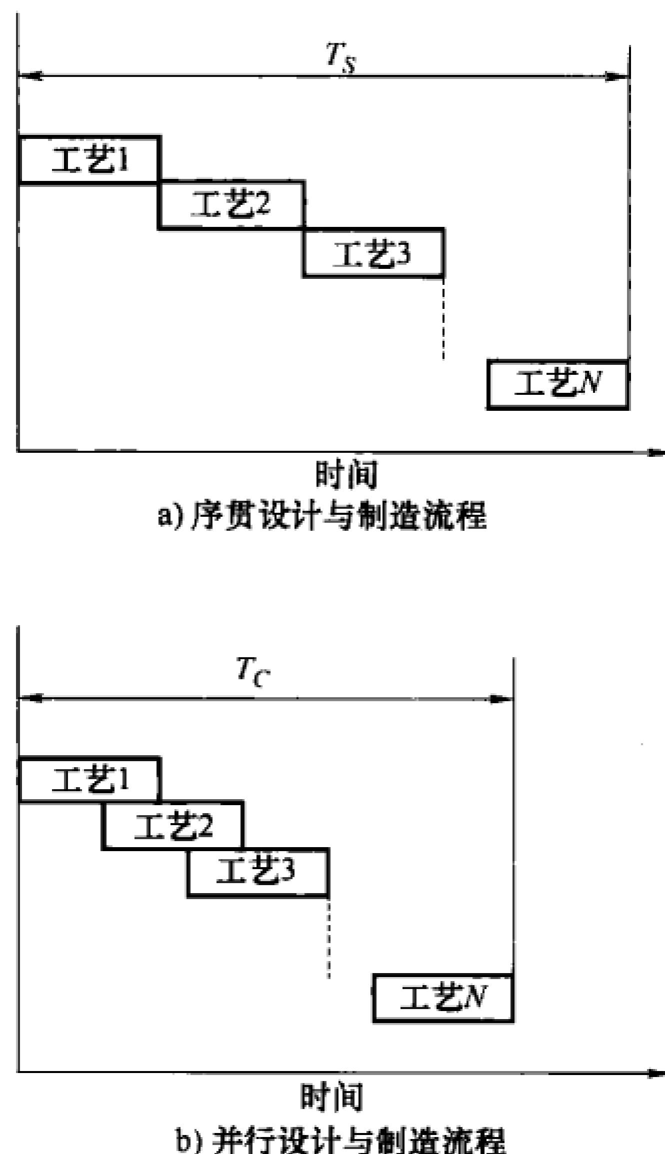


图 3.6 在产品设计过程中应用并行工程的基本流程

从集成（Integration）的角度来看，并行工程和 CIM 具有相似的理念，但前者强调在早期生产阶段同步、并行地制订决策。

基于并行工程的工作流程可以显著减少各类工作的完成时间。图 3.7a 所示为序贯设计与制造流程，它拥有 N 个工艺过程，前一个工艺完成之后，后一个工艺才开始进行，完成所有 N 个工艺过程需要的时间为 T_S。图 3.7b 所示为并行设计与制造流程，对某个工艺过程所需时间进行修正后，就可以同时或在重叠的时间段内开展某些工艺工作。这种情况下，完成 N 个工艺过程所需的时间 T_C 明显比 T_S 少很多。虽然典型的产品设计与开发都有一些独立的过程，但实施并行工程后，可以极大地减少产品设计与开发所需的时间。



a) 序贯设计与制造流程

b) 并行设计与制造流程

图 3.7　序贯设计与制造流程和并行设计与制造流程的对比

在产品制造中实施并行工程时，重要的是不仅要减少开展各个过程工作所需的时间，还要能够在产品性能和制造成本方面有所突破。通常，要在某些约束条件下寻求那些能提供最优产品性能的设计，再制订详细的制造方法和流程，这样才能以最低的制造成本实现特定的产品设计。然而，减少制造成本和提升产品性能之间存在冲突关系，因此很难得到唯一的最优解。首先寻求一些备选解决方案，然后再从中选择能满足特定产品要求的最优解。

此处用一个焊接结构件来说明并行评估制造成本和产品性能的重要性[12]。

当用焊接方式形成某个结构时，必须把很多个结构件焊接在一起。为了提升焊接件的性能（例如减小应力、提高刚度），通常需要添加加强筋、支承等，这会把结构件划分成很多分区，特别是在结构件的内面处。图 3.8 所示为某结构的横断面形状。该结构在垂直方向上划分出了一些区域，但分区间复杂的焊接增加了焊接成本。用 N 表示焊接件的总数，焊接成本可以表示为 $\sum_{i=1}^{N} Q_i L_i$。其中，Q_i 和 L_i 分别表示焊接件 i 每单位长度的焊接成本和焊接长度。

详细设计阶段的决策需要通过同步评估结构件的性能和制造成本（此处为焊接成本）来制订。例如在式（3.1）中，结构件的具体形状可以通过最小化焊

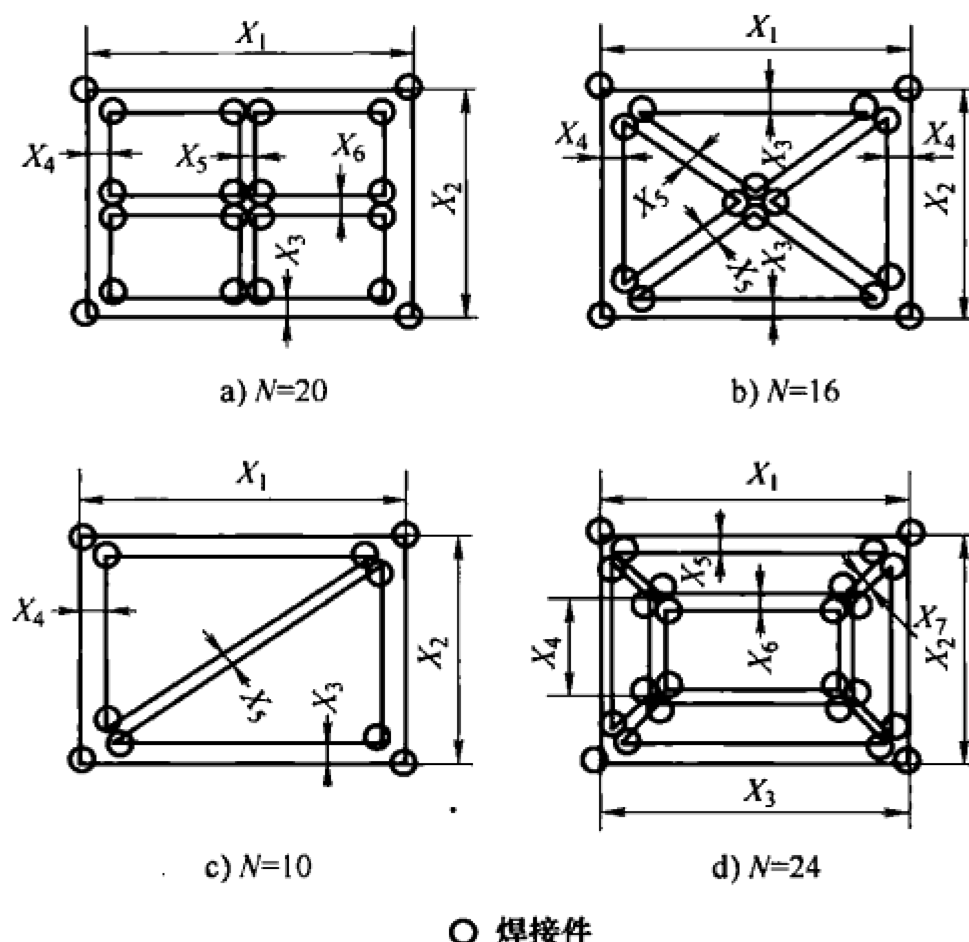


图 3.8 某结构的横断面形状（N：焊接件总数，X：设计变量）

接成本 f 来确定，这样可以保证局部形变的最大值 Δ_{max} 不会超过形变上限 Δ^U：

$$f = \sum_{i=1}^{N} Q_i L_i \rightarrow \text{最小化} \tag{3.1}$$

约束条件：$g = \Delta_{max} - \Delta^U \leqslant 0$。

图 3.9 所示为焊接结构的性能和焊接成本之间的关系。优化之后，可以在不影响其他性能的情况下，最小化焊接成本，在点 P_1 处表示焊接成本与特定性能的关系，通过绘制点 P_1 至 P_2 之间的曲线并延长，设计求解过程就会得以简化；在点 P_2 至 P_3 间的区域中，焊接成本下降；但结构性能也相应下降；在点 P_3 至 P_4 间的区域中，焊接成本的小幅下降就能造成结构性能的急剧恶化。

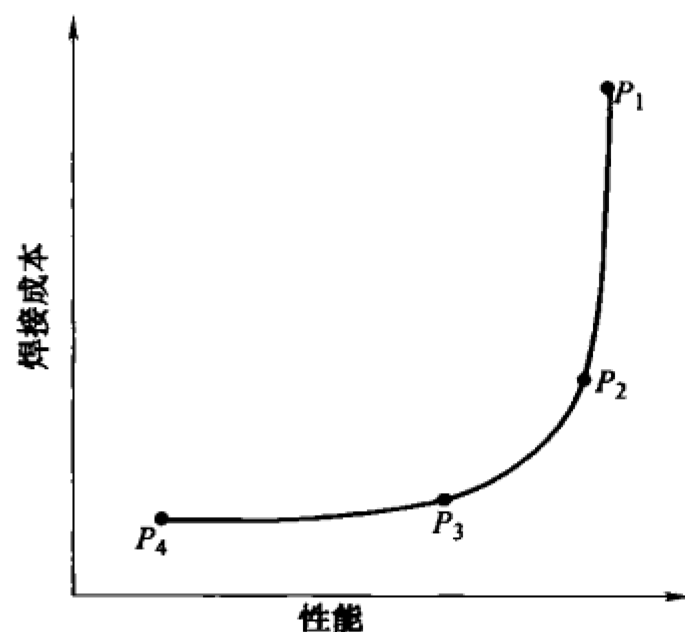


图 3.9 焊接结构的性能和焊接成本之间的关系

由点 $P_1P_2P_3P_4$ 定义的曲线相当于多目标优化问题中的帕累托最优解集，其目标是最大化性能特征，最小化焊接成本。图 3.9 给出了求解方程 (3.1) 得到的曲线，它表明线上的点 P_2 和 P_3 之间的解是最适用的。

在实施并行工程时，需要相互协调、同步、并行地决策产品设计与制

造的相关因素。实施并行工程也就意味着所有部门要同时在一起相互协调地工作，在产品细节设计之前对一系列因素作出决策。计算机网络的使用有助于完成这项工作。熟练运用“并行工程”的思想，不仅可以节约时间（因为并行、同时处理相关工作更加高效），还能提高得出更好优化结果的概率，使得产品的制造成本更低、产品性能和质量更高。并行工程的实施能得出更宽的可用设计区域，也使得从这些区域内获取最优解的过程变得更加容易，不同部门间相互竞争的要求条件、存在冲突的评价因素以及产品特征间的权衡关系都能得以完美解决，企业内部的相互理解和协作氛围也能得以改善。为了完成决策所要覆盖的范围，需要考虑多方面的因素，还必须要解决更大范围内的决策问题。

由不同制造商共同制造出的产品最终会被消费者购买并使用，在需要的时候还要进行维护，直到产品不能再继续使用。届时，可以在一定程度上回收某些产品零部件或材料，以供循环利用，其余的则完全废弃。产品的这种从生产、使用、维修、再利用、循环再利用，最终到废弃的过程称为产品的生命周期。为了优化产品设计，需要在尽可能早的设计阶段，仔细考虑与产品生命周期相关的所有因素。图 3. 10 所示为与产品生命周期设计有关的因素[13]。

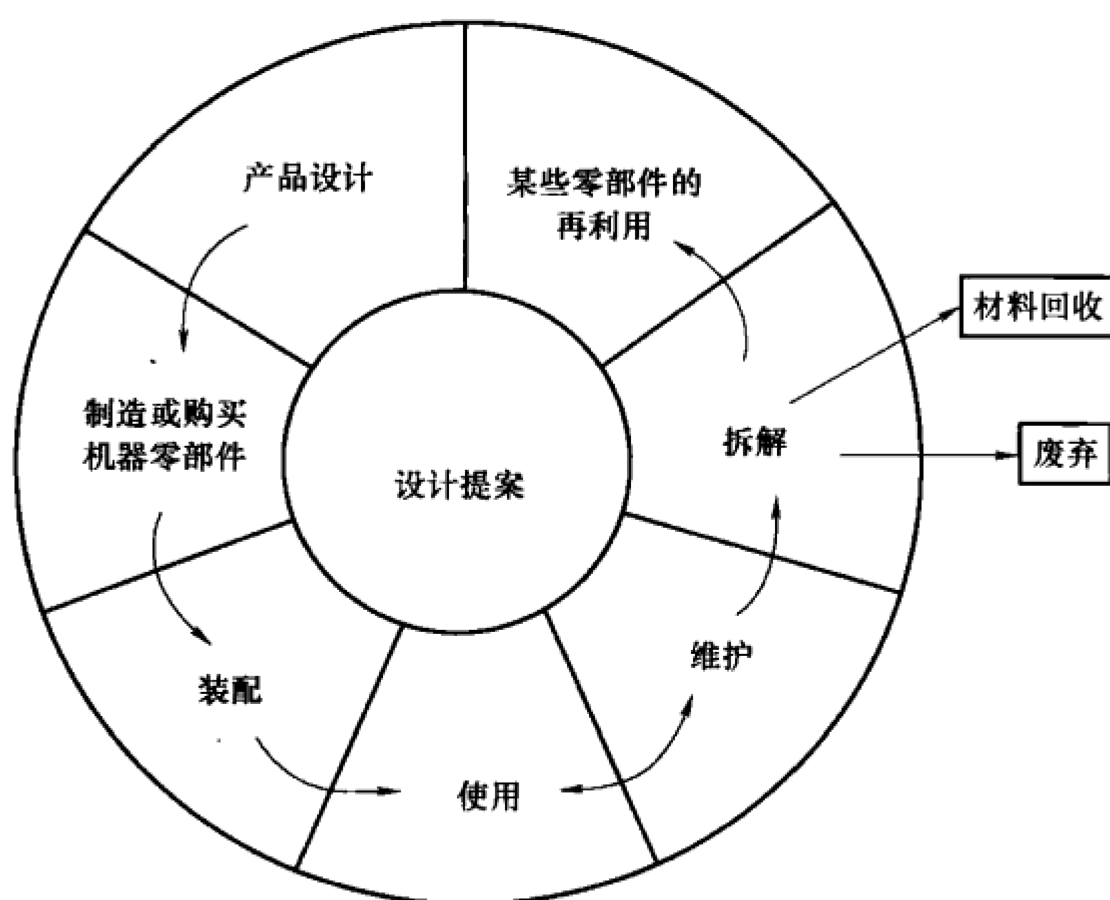


图 3. 10　与产品生命周期设计有关的因素

产品的生命周期中可能会出现各种各样的异常情况。某些不良结果会影响用户对产品的使用或影响用户对产品的满意度，还有某些不良结果可能会影响产品的使用环境或更高一层的用户生活环境。如果仅在这些不良情况出现时才考虑如何去消除它们所带来的恶性影响，那么设计优化的结果和对产品的改进将明显差

于在产品设计阶段早期就考虑并处理这些问题。

考虑到生产厂家要负责部分维修任务，在与生产管理者和维修专家沟通之后，产品设计师需要考虑实际的生产计划和要求，以保证维修的便利性。在实际的维修中，维修专家、生产管理专家以及设计师都要能够访问通用网络数据库，在其中查阅以往的流程和维修方法，以及其中存储的新知识。维修专家可以利用这些维修方法和知识开展维修活动。随着时间的推移，产品设计和维修知识的累积将变成非常有用的资源，它可以提高决策的速度和效力。由于这些知识是通过各部门间相互交流得到的，它不仅可以用于所关注问题的决策，也可以用于指导更广范围内的企业运行，如未来的设计方向。

传统的序贯制造流程是通过部分优化的累积完成的，而基于并行工程的制造流程的目的是寻求全局优化结果，如图 2. 11 所示的 *PQ* 曲线。同样，基于并行工程的优化方法和技术也改变了产品设计与制造中的传统决策方法，有助于获得全局性的、更优秀的产品设计解决方案。并行设计和并行工程的决策方法改进了主要关注于设计和制造过程自动化的传统制造系统，重新构建了设计与制造过程中的信息传输。

通过同步考虑以前单独考虑的因素，并行工程能产生协同效应，为产品设计与制造优化提供更多的益处，使其更具有效力。这与将要讨论的协同概念有一定的关系。并行工程是一个非常重要的优化策略，它常用于产品设计与制造，但其概念和基本流程也可以用于一般的优化和决策问题，以寻求更优解决方案。

3. 4 协同工作

协同概念已广泛应用于各种领域，它指拥有特定知识、技能、技术和方法的专家们在共同开展同一项目时，相互协调地共享信息。此处的专家组可以由关注于相同研究领域、在不同公司工作的专家组成，也可以由完全致力于不同领域研究的专家组成。这种多学科的协同所能带来的益处将远远大于传统的、局限于单个学科组、企业部门或行业协会的专家的协同。图 3. 11 所示为拥有不同专业技术的企业间的协同示意图。

个人、单个部门、工厂或企业都在技术和材料资源方面有一定的局限性。在产品制造中，通常需要新技术和知识来以较低的制造成本实现更高的功能和产品性能。但对于单个企业来说，即便耗尽所有的知识和技术，也不一定能实现这一目标。为了克服这种缺陷，不同企业或组织之间的协同是一种有效的产品制造方式。在这种协同中，企业之间常常会组成联盟——也就是所谓的虚拟企业或虚拟公司，以弥补单个企业的资源不足，最大化利用可用的管理和技术资源。

在网络技术普及之前，距离是有效协同的最大障碍。现在，高效信息网络技

术的使用已无处不在。聚集广泛可用的知识和经验，并行地评估关于产品的多种因素的能力，这样可以获得更加优化的设计解决方案。本书提出了新的生产方法——各种专家相互协调地完成同一目标，这提升了突破设计方案并获得更优解的可能性。

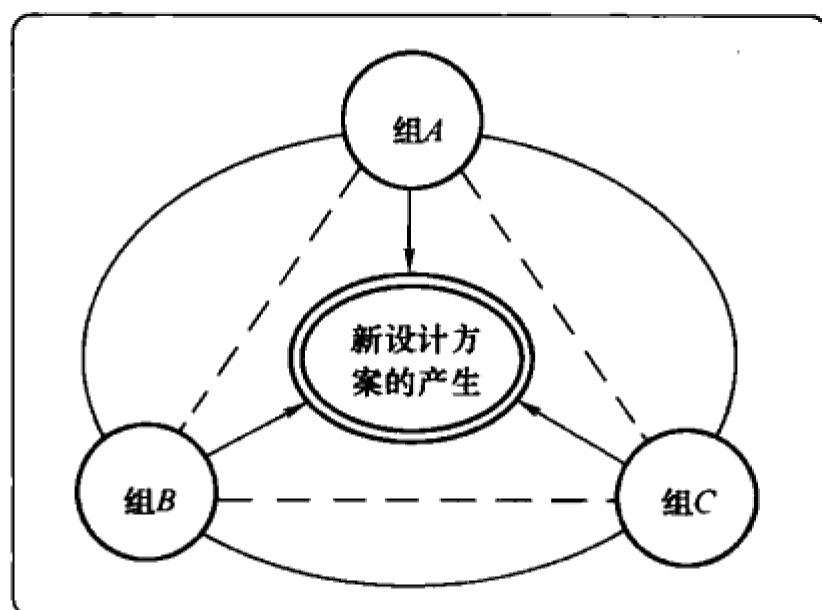


图 3. 11　拥有不同专业技术的企业间的协同示意图

然而，要利用协同技术的优势，并不一定非要使用网络技术。如果协同组的成员既可以进行面对面的会议，也可以实现协同技术能达到的效果。协同结果将惠及所有成员，他们对所得结果的满意度将远远超过不实施协同所得的结果。但是，如果缺少适当的成功协同条件，不仅无法达到协同所能带来的益处，而且会由于私有技术、知识、专门知识和技能之类的传播还将对协同成员造成实质性的危害。

图 2. 11 中的粗实线 PQ 表示基于上述并行工程，使用现有技术和知识所得的帕累托最优解集。但在现实中，使用协同技术的目的是寻求突破 PQ 曲线的 $P'Q'$曲线所表示的解。

设计师 α 和 β 分别代表了各自所在的公司，两者相互协调，共同开发产品。图 3. 12 所示为设计师 α 和 β 共享知识的模型。其中一个设计师缺乏的知识由另外一个设计师来补充。在开发新产品时，如何有效地利用这类外部知识和信息通常是关键所在[14]。

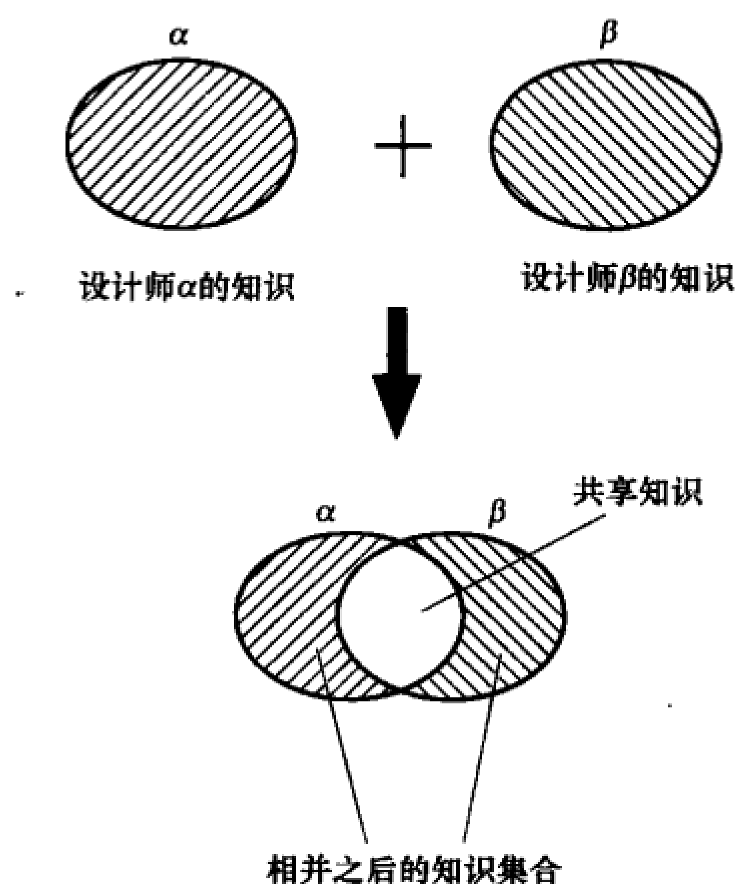


图 3. 12　设计师 α 和 β 共享知识的模型

此处以工业机器人的设计为例，设计师 α 和 β 协同完成此工作。设计这一产品所需的知识包括材料（I_1）、机械臂的截面形状（I_2）、发动机和连接件相关知识（I_3）。所要评价的产品特征包括结构的总重 W，从起始位置到终止位置的最大动态位移 δ 和运行时间 T。

对于这一项目，设计师 α 和 β 在项目开始前已具备一定的知识。设计

师 α 对于设计高效运行的工业机器人非常精通，也使用过高速发动机，知道如何通过设计提升轻量级移动机械臂的优点，但缺乏与材料相关的详细设计知识；设计师 β 比较了解如何设计高精度的工业机器人，知道如何利用与材料相关的知识以及材料的特性来提升机器人的运行精度，但缺乏关于高速运行机械臂所用发动机的详细知识。

在这种情况下，两个设计师只有相互向对方分享自己所具备的知识，才能开发出既能高效率运行、又具备高精度的产品。

图 3.13 给出了每个设计师单独进行设计所得的解和通过协同设计所得的解，并对这两者进行了比较。相对于设计师 β 所得的设计解，设计师 α 所得的设计解拥有较小的 T 值，但 δ 却较大。因此，由某个设计师单独进行设计时，无法保证所得的产品拥有较好的 T 值和 δ。相比之下，基于知识共享的协同设计所得的帕累托设计解曲线更接近于理想解，它既有设计师 α 所得的最佳 T 值，也拥有设计师 β 所得的最佳 δ 值。他们可以进一步从协同所得的设计解中选择最优的设计解。

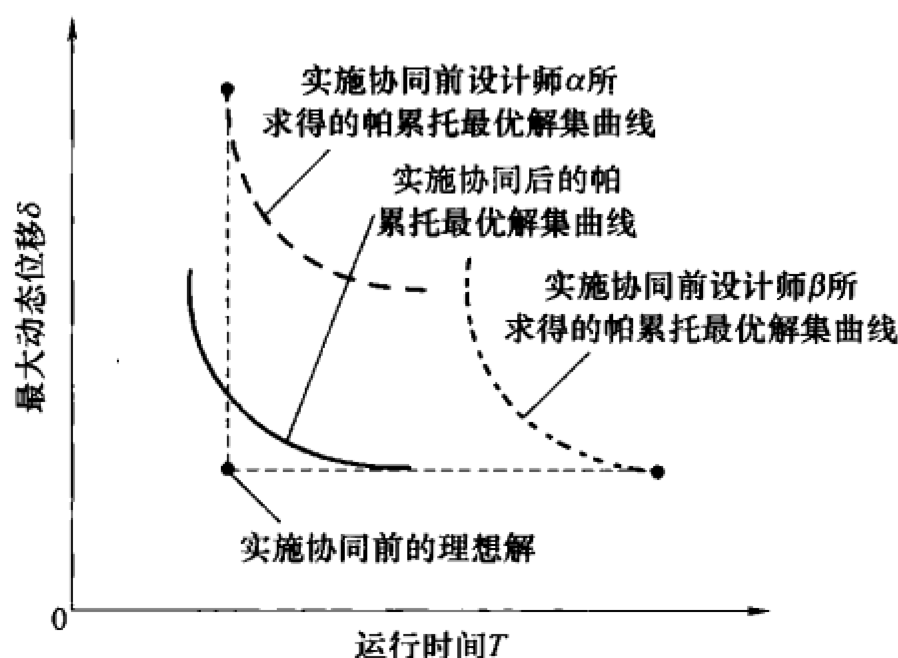


图 3.13　协同对帕累托最优解的影响

对于两个设计师的知识共享，我们可以把“设计师”替换成“小组”或“部门”，甚至是“企业”。当不同的企业因为某个项目通过网络系统虚拟地结合起来时，他们也可以通过知识共享来解决设计问题。

协同技术提供了突破现有设计水平、寻找更优设计解的可能，是制造方法中非常重要的概念。然而，成功的协同依赖于有效的支持系统和相关工具的应用。例如在产品设计活动中，各协同组的成员间要相互沟通各种各样的设计信息。为了管理整个协同的流程、知识的存储和数字化信息的发布，需要使用到计算机网络和数据库技术。CSCW（Computer Support Cooperative Work，计算机支持的协同工作）是一个有效的协同支持框架，协同软件是一个非常实用的协同系统。

取得成功协同最重要的一点是选择适当的协同搭档。在高度发达的网络中，可选择的搭档非常多。因此，有助于选择适当搭档的支持系统就非常有用，它提供了量化评估方法，用于评估与不同搭档协同工作的有效性。

一个用以评估设计师 α 和 β 协同工作有效性的程序如下：

步骤1：选择需要评价的产品设计相关项，分别记为 I_i（$i=1, 2, \cdots, N$），N 是评价项的总数。

步骤2：当协同双方共享项 i 所需的知识，对于设计师 α 和 β 能否获得新的知识：

$\omega_{\alpha i}=1$ 时，设计师 α 获得了新知识；

$\omega_{\alpha i}=0$ 时，设计师 α 没有获得新知识；

$\omega_{\beta i}=1$ 时，设计师 β 获得了新知识；

$\omega_{\beta i}=0$ 时，设计师 β 没有获得新知识。

步骤3：当获得了新的知识，但如果这些知识对于获得知识的设计师并不重要，那么这一获取过程对于协同项目毫无意义。

设计师 α 和 β 分别为项 i 定义重要性级别 $S_{\alpha i}$ 和 $S_{\beta i}$（可以使用第7.2.2节中介绍的配对比较法完成）。

步骤4：定义知识共享的获益水平。当共享所有项时，设计师 α 的获益水平 S_α 可计算为

$$S_\alpha = \sum_i \omega_{i\alpha} S_{i\alpha} \tag{3.2}$$

同样，当共享所有项时，设计师 β 的获益水平 S_β 可计算为

$$S_\beta = \sum_i \omega_{i\beta} S_{i\beta} \tag{3.3}$$

步骤5：只有当每个成员都可以通过对方的知识共享获益时，才能成为真正的协同工作或协同项目开发。如果协同只能对某一个设计师或设计师群体的某一小部分带来益处，那么这类协同是不可行的。

判断协同的有效性时，首先，如果设计师 α 和 β 都能获得他们认为重要的知识，那么协同是有效的；其次，在知识共享下，两个设计师的获益水平都较高时，才能根据以下评价过程判断协同的可行性。

把设计师 α 和 β 的获益水平 S_α 和 S_β 的乘积记为 Ψ：

$$\Psi = S_\alpha S_\beta \tag{3.4}$$

把 Ψ 的下边界定义为 Ψ^L，当 $\Psi < \Psi^L$ 时，可以认为协同是不可行的。Ψ^L 的默认值为0.25，相当于每个设计师都拥有0.5的获益水平。根据两个设计师的需要不同，可以调整 Ψ^L 的值。当 $\Psi \geqslant \Psi^L$ 时，执行进一步的评估。如果两个设计师都不能获得有用的知识，或者两者的获益水平差距很大，那么协同也是不可行的。两个设计师的获益水平的比值为

$$\Phi = \frac{\min\ \{S_\alpha,\ S_\beta\}}{\max\ \{S_\alpha,\ S_\beta\}} \tag{3.5}$$

其中，$0 \leqslant \Phi \leqslant 1$。当 $\Phi \geqslant \Phi^L$ 时，可以认为协同工作可行；$\Phi < \Phi^L$ 时则不可

行。Φ^L为决定协同工作可行与否的两个设计师获益水平的比值，默认值为0.5。也就是说，其中一个设计师的获益水平是另外一个设计师的两倍。Φ^L的值也可以在两个设计师协商一致的情况下进行调整。

当启动一个开发新产品的项目时，企业P_0要从可选的合作企业P_1，P_2，…，P_N（N是可选搭档的总数）中选择一个企业作为协同搭档[15]，选择过程包括以下两个步骤：

步骤1：根据可选企业现有的技术状况排除那些不合适的选项。

步骤2：从步骤1选出的选项中找出最合适的协同搭档，选择标准是以较低的研发要求开发出所需的新技术。

在选择协同搭档时，对于发起协同项目的企业来说，需要的是自己不具备的技术。因此，要更多地考虑把那些拥有此类最强技术的企业作为搭档。在步骤1中，发起企业P_0所拥有的技术j的等级与备选搭档P_i拥有的技术j的等级差$\theta_{jP_0P_i}$的绝对值可计算为

$$\theta_{jP_0P_i} = | T_{jP_0} - T_{jP_i} | \tag{3.6}$$

其中，T_{jP_0}是发起企业P_0所拥有技术j的等级，T_{jP_i}是发起企业P_i所拥有技术j的等级。

当发起企业P_0的技术j的等级低于备选搭档的技术等级，即$T_{jP_0} < T_{jP_i}$时，技术等级差的绝对值总和S_i可计算为

$$S_i = \sum \omega_j \theta_{jP_0P_i} \tag{3.7}$$

当发起企业P_0的技术j的等级高于备选搭档的技术等级，即$T_{jP_0} > T_{jP_i}$时，技术等级差的绝对值总和I_i可计算为

$$I_i = \sum \omega_j \theta_{jP_0P_i} \tag{3.8}$$

发起企业和其搭档在协同中立即可用，无需再开发的技术E_i可表示为

$$E_i = S_i I_i \tag{3.9}$$

E_i的值表示发起企业和其搭档在某项技术方面的差异。较大的差异会产生较大的E_i值。图3.14所示为S_i和I_i的关系。把S_i和I_i分别表示坐标系的横纵轴时，E_i就是图中的矩形区域。这是一种直观地表示发起企业与其搭档之间在某方面技术差异的方式。区域面积越大，表示两企业在某项技术方面的水平差异就越大。越大的区域表示协同带来的获益越大，但区域的形状是关键所在。正方形表示两企业的获益水平相同，如果正方形的某一边被拉长，变成矩形，就表明两企业在协同中的获益不对称，某一企业获得的收益大于另一企业。这种不平衡的协同可能会产生不太好的结果。

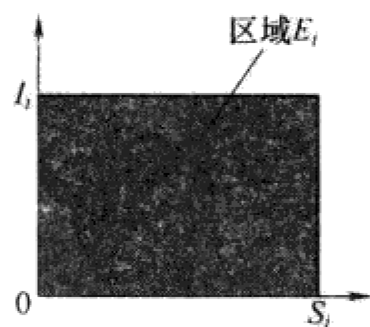


图3.14　S_i和I_i的关系（两协同企业间在某技术方面差异的绝对值）

通过以下步骤，可以排除那些不符合要求的备选搭档：

① 步骤1：评估图3.14中水平轴线上S_i的值和垂直轴线上I_i的值之间的差异，如果S_i和I_i的差值较大的话，表示预期获益水平的不对称，排除对应的备选搭档。

② 步骤2：比较备选搭档之间E_i值的差异。排除那些拥有较小E_i值的企业，因为与这些企业合作只能获得最小的收益。

在步骤2中，根据新开发的技术，从剩余的备选企业中选择搭档。首先，计算通过研发实现的技术目标与现有技术的差异。设所需的技术为γ_k，$L_{\gamma_k P_i}$为发起企业P_0和搭档P_i共同开发技术所需付出的努力：

$$L_{\gamma_k P_i} = E_{kg} - E_{ka} \tag{3.10}$$

式中，E_{kg}是技术γ_k所要达到的目标，E_{ka}是技术γ_k当前的水平。

独自开发新产品所需的技术φ_{P_i}要付出的努力为

$$\varphi_{P_i} = \sum_{k=1}^{m} L_{\gamma_k P_i} \tag{3.11}$$

式中，φ_{P_i}也可以表示企业独自开发新产品的难度水平。

需要协同开发的新技术的数量记作$\varphi_{P_0 P_i}$，通过式（3.12）计算：

$$\varphi_{P_0 P_i} = \sum_{k=1}^{m} \min(L_{\gamma_k P_0}, L_{\gamma_k P_i}) \tag{3.12}$$

为了提升协同能达到的效果，拥有较小$\varphi_{P_0 P_i}$值的企业是较好的搭档。

那些拥有较符合需求技术的企业可作为协同的搭档。式（3.13）中的比值D_{0i}表示开展协同设计时，发起协同的企业可不必再开发的新技术的数量。

$$D_{0i} = \frac{\varphi_{P_0} - \varphi_{P_0 P_i}}{\varphi_{P_0}} \times 100 \tag{3.13}$$

式（3.14）中的比值D_i表示开展协同设计时，协同伙伴P_i不必再开发的新技术的数量。

$$D_i = \frac{\varphi_{P_i} - \varphi_{P_0 P_i}}{\varphi_{P_i}} \times 100 \tag{3.14}$$

从协同发起企业和最佳搭档的选择来看，当以上两个减少量D_{0i}和D_i足够大时，企业P_i才可选作协同搭档。这样，两个企业需要开发的新技术数量才是最低的。

企业间激烈的竞争非常频繁，这会导致缺乏对自然环境破坏的关注，无法更大地发挥自然资源的作用，但却会促进企业的技术升级。每个企业都试图超越其他企业，赢得更多的消费者，但却不关心相关活动对社会的影响。因此，全球市场内的企业协同才是现在，甚至是未来的生产模式。但是，企业间的协同并不意味着失败的几率会加大，也不意味着企业联合或者实施协同之后会遇到更多的困难。用上述的某种方法来选择最佳的协同开发搭档正变得越来越重要，这也变成了一个热门技术话题。

思考题

3.1 为什么在产品设计中实施并行工程可以得到更优的设计解，不仅可以节约产品开发时间，还能提升产品性能、质量并节约制造成本？

3.2 讨论当拥有不同知识和技能的专业人员协同工作时，获得突破性设计解的可能性，并阐述能促进获得成功设计解所需的特定条件。

参考文献

1. Yoshimura M, Izui K (1998) Machine system design optimization strategies based on expansion and contraction of design spaces. In: Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. AIAA-98-4749, September, St. Louis, USA, pp320–330
2. Yoshimura M, Nose K (1994) Generation of conceptual design for structural shapes and functional elements of machine systems having no preconceptions concerning the design. In: Proceedings of the 1994 ASME Design Automation Conference, Vol.2, Sept.:83–89
3. Benhabib B (2003) Manufacturing—design, production, automation, and integration. Marcel Dekker
4. Hitomi K (Supervisor), Nakajima K, Yoshimura M, Yoshida T (eds) (1984) CAD, CAM, and CAP by computers (in Japanese). Kyoritsu-Shuppan
5. Harrington J (1973) Computer integrated manufacturing. Industrial Press
6. Hitomi K (Supervisor), Nakajima K, Yoshimura M, Yoshida T (eds) (1993) Fundamentals of CIM – Design, manufacturing, and management by computers (in Japanese). Kyoritsu-Shuppan
7. Yoshimura M (1993) Concurrent optimization of product design and manufacture, In: Parsaei HR, Sullivan WG (eds) Concurrent engineering–contemporary issues and modern design tools, Chapman & Hall, London:159–183
8. Yoshimura M (1994) Integrated optimization of produt design and manufacturing. In: Leondes CT (ed) Control and dynamic systems–concurrent engineering techniques and applications, Volume 62, Academic Press, San Diego:167–219
9. Yoshimura M, Takeuchi Y, Hitomi K (1984) Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity. Transactions of the ASME, Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design, 106(4):531–537
10. Yoshimura M, Itani K, Hitomi K (1989) Integrated optimization of machine product design and process design. International journal of production research, 27(8):1241–1256
11. Yoshimura M (1996) Design optimization for product life cycle. In: Huang GQ (ed) Design for X: concurrent engineering imperatives, Chapman & Hall, London, pp424–440
12. Yoshimura M, Takeuchi A (1994) Concurrent optimization of product design and manufacturing based on information of users' needs. International journal of concurrent engineering: Research and applications, 2(2):33–44
13. Doi K, Chujo Y, Yoshimura M, Nishiwaki S, Izui K (2009) Construction of an optimum system design method considering product lifecycle. International journal of sustainable engineering, 2(3):171–183
14. Yoshimura M, Yoshikawa K (1998) Synergy effects of sharing knowledge during cooperative product design. Concurrent engineering: Research and applications, 6(1):7–14
15. Yoshimura M, Izui, K, Kida S (2005), Decision support system for selecting collaborative product development partners. International journal of concurrent engineering: Research and applications, 13(1):5–11

第4章　产品制造中的人类因素

当把产品制造创新当做所要追求的目标时，人所扮演的角色就非常重要了。人们会自然地对事物作出审美和情感方面的判断，在特定的环境下，还会与同事一起享受创造新事物和协同工作的快乐。如果允许客户对那些可以直接影响产品设计创新的改进进行评价，美学和人机工程学方面的因素就变得十分重要，因为如何创造出更好的产品在很大程度上取决于人的判断和感性。为了最大限度地发挥协同小组在设计和制造中的作用，应该对小组成员的选择过程予以优化。本章将介绍客户与厂家、产品制造和那些对特定人群显得最为重要的产品个性特征之间的关系；然后通过设计案例阐述感性工程学（Kansei Engineering）和人机工程学（Ergonomics）的概念，并说明这些概念的应用方法；最后介绍理想化的协同环境，它会对协同小组成员的个人能力和喜好进行考量，并会对此进行整合和权衡。

4.1　产品制造过程中个人的作用

4.1.1　人的能力

人的能力大致可以分为生理能力和心理能力两类。人类所有的工作和生活几乎都会同时涉及生理和心理两方面的能力。心理能力可以分成逻辑能力和美学能力，人显然是两者的结合。人所具有的大部分生理能力都可以用机器或自动化系统模拟实现，且某些逻辑能力可以用计算机模拟再现，这样相关的理论和分析评估就可以得出定量结果。然而，对主观因素和审美因素进行定量评价却较为困难。客户对流行产品的满意程度在很大程度上取决于心理因素，尤其是主观和审美因素。这些因素非常重要，但通常难以对其进行整理和分析。

为了减少在产品设计，尤其是制造过程中的劳动投入，人们已经付出了很大努力，实现了许多操作的自动化或者计算机化。然而，对机械式、模式化解决方案的热衷有时往往会掩盖这样一个事实：只有人才能够创造出更好的产品。归根结底，要创造出更好的产品，很大程度上还是要取决于人类的判断力和感知力。

图4.1所示为从感性角度看人与生俱来的能力，它总结了人类作出判断、创造新事物并与同事协同工作的先天能力。设计人员拥有作出理性或感性判断，评估产品的美观性、用户满意度、适用性，并判断产品能否完成它所提供的功能和舒适度等多方面的技能。人们也拥有在上述实用与审美特征的基础上创造产品或

理念的能力。在协同工作中，特别是与同事和志同道合的人协同工作时，人所具有的个性要么促进，要么就会阻碍整个团队获得更优设计结果。在图 4.1 中所示的能力很少可以通过知识的累积或者训练而获得，它们具有很大的个体差异。

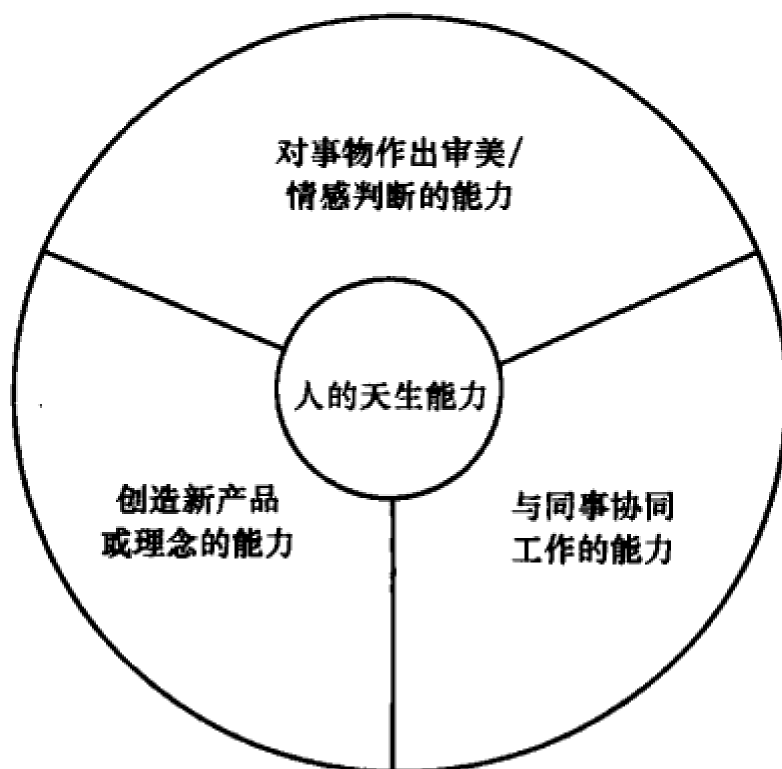


图 4.1　从感性角度看人与生俱来的能力

4.1.2　客户和制造商的关系

产品制造的一个主要目标就是尽可能满足客户持有和使用产品的满意度，并识别不同客户对产品的满意度，提供令客户满意的产品。产品制造商能较容易地评估出产品的性能、质量、功能和制造成本等定量属性，但如果要把美学和人机工程学因素融人到产品的设计中，则必须重视那些积极参与该产品设计评价的客户。客户通常是最直接使用并维护产品的人，因此，除了要关注影响客户购买决策的相关因素外，还要关注一个问题：客户不再使用这些产品之后，该如何处理它们。在现今的产品设计中，制造商要向客户展示产品的实际操作方法和维护方法，用户在此过程中的观察和评价能够有效地影响对该产品的购买决策。近期趋势表明，客户已经开始逐渐关注生产制造商和产品使用过程对自然环境产生的影响，并要求制造商作出规划，实现废弃产品部件的循环利用。忽视这些趋势或者不重视客户需求的产品将逐渐被市场淘汰。

例如那些需要耗费大量自然资源的产品，或是很快就丧失其所应具备功能的产品，即使它的价格很低，也不可能让客户高度满意；相反，环保产品会越来越有吸引力，并将得到较高的客户满意度。总而言之，产品对其使用环境的尊重程度、对环境的影响程度在提升客户满意度方面的作用越来越重要。因此，那些不仅可以让用户在所制造产品中进行挑选，而且还能让用户有效参与产品设计，满足用户特定需要和要求的制造模式是最理想的方法，如图 1.6 所示。

目前，许多产品制造商已在产品设计过程中考虑了产品的生命周期问题，但他们还需要做的是让客户更加积极地参与产品设计工作，这样可以带来更多的益处。也就是说，当制造商和客户真正在产品设计中相互合作时，才可能提高产品的制造效率和使用效能，才能以最小的负面影响实现最大的客户满意度。

4.2　感性工程学

由于生活方式越来越多样化，人们对产品功能和质量提出了更高的要求，同时还要求产品更加多样化。那些能够影响人们使用新产品时精神和情感满意度的美学因素在购买决策中变得越来越重要。感性工程学（Kansei Engineering）是一种将精神和情感等主观因素纳入常规产品设计的技术。它从美学和情感需求的角度出发，对产品的性能和质量之类的客观因素进行评价[1]。

人有五种身体感官，即视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉，如图4.2所示。每种感官都与人的感性认知有关。与感性（Kansei）最为接近的英文词组是主观态度（Subjective Attribute）或美学因素（Aesthetic Factor）。“感性工程学”一词广为人知，且已全球通用[2]。

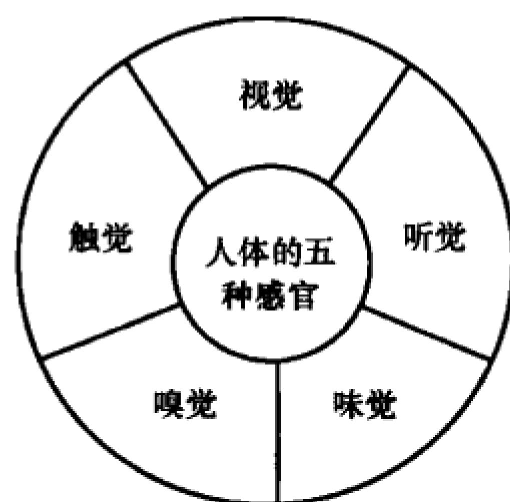


图4.2　人体的五种感官

广义上讲，感性工程学包括在人机工程学（Ergonomics）领域内。产品的某些因素可以在使用中减轻人体疲劳，确保持久的舒适度；另外，产品的物理特性要“符合”人的尺度，人机工程学主要用来对这些因素进行评价。感性工程学需要考虑情感、精神满意度以及人体舒适度等方面，不仅要对广大客户日常使用的产品进行感性评价，而且还要对制造领域中的工业机器（如机床和工业机器人）进行感性评价，这样才能最大化工人的舒适度，最小化影响工人积极性的因素。进一步讲，感性评价对于第5章所述的产品制造支持体系的研究和发展也非常重要，它可以使产品研发、设计和制造中人的感性能力得到淋漓尽致的发挥。

感性评价在产品色彩和外观上的应用最为广泛，但对于机器产品来说，用户的喜好和产品运行中的感性评价同样重要。图4.3所示为使用SD法的产品感性评价流程图，给出了一个感性评价流程示例，并在图4.4中列出了一个机械臂通过运动把一杯果汁递给消费者的示例，作者对这一过程进行了感性评价[3]。

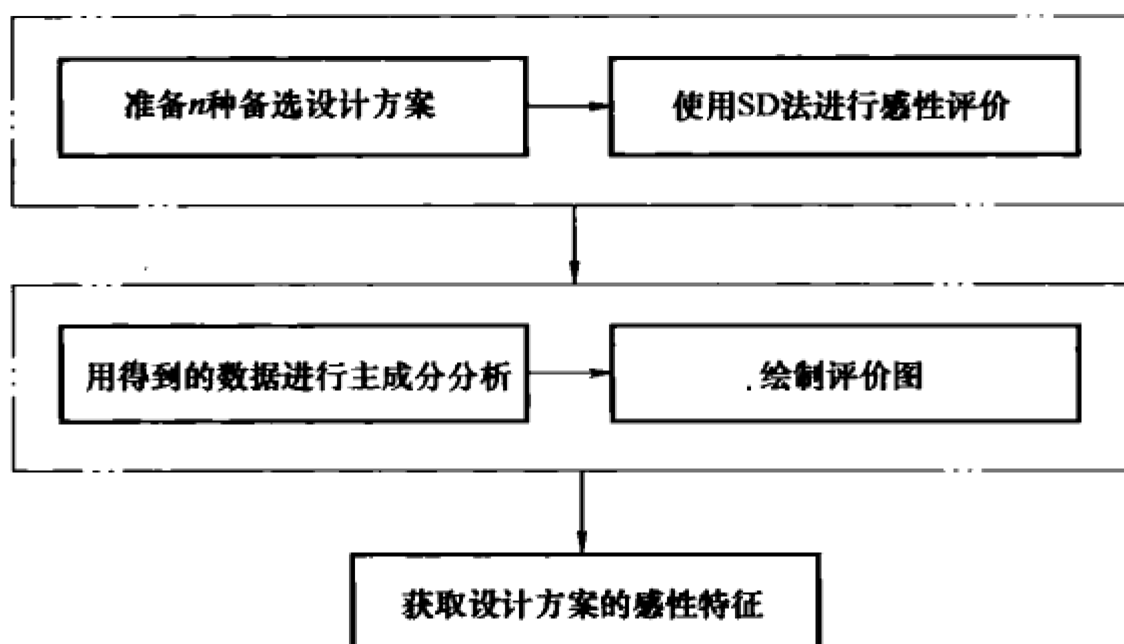


图 4.3 使用 SD 法的产品感性评价流程图

如图 4.4 所示，机械臂拿着一个杯子，并在 A 点把果汁倒进杯子，然后把杯子递给 B 点的消费者。评价这一运动过程中的感性因素。不同设计规范的组合可以得到不同类型的机械臂，图 4.5 所示为不同类型设计模型的说明。由于这些机构有三个或更多个自由度，增加了产品成本和操作的复杂性，并且造成了功能冗余，但如果这些机构能够产生出众的感性印象，这些设计或许值得付出更多成本。至于末端执行器（机械手）的运动形式，曲线运动的效率可能不如直线运动，但在感性方面优于直线运动。在匀速运动前后，手部执行器的不同加速度会产生不同的感性印象。通过组合不同的设计规范，可以得到以下 10 个备选产品设计方案：

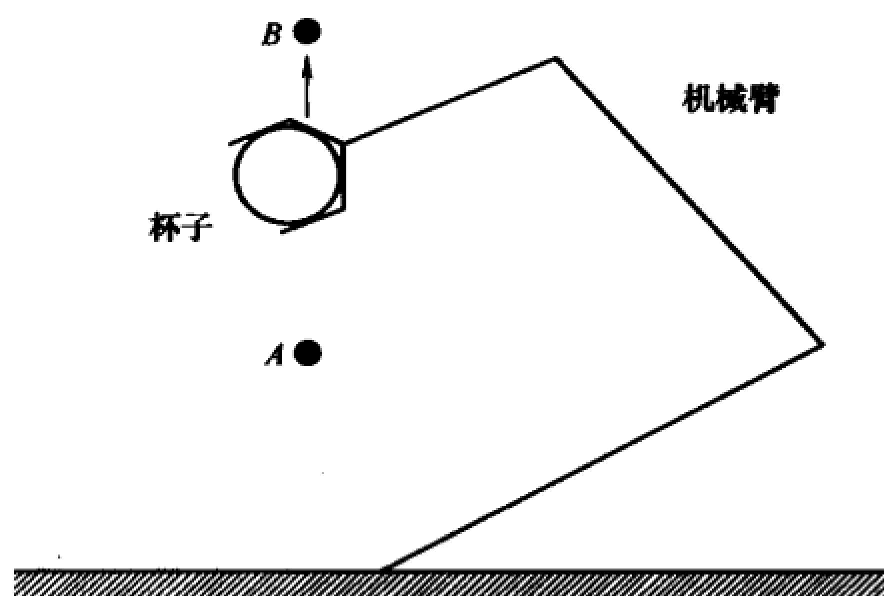


图 4.4 机械臂传递一个杯子

① 两个自由度，直线运动，对称运动模式。
② 两个自由度，直线运动，非对称运动模式。
③ 两个自由度，曲线运动，对称运动模式。
④ 两个自由度，曲线运动，非对称运动模式。
⑤ 三个自由度，直线运动，对称运动模式。
⑥ 三个自由度，直线运动，非对称运动模式。
⑦ 三个自由度，曲线运动，对称运动模式。

⑧ 三个自由度，曲线运动，非对称运动模式。

⑨ 四个自由度，直线运动，对称运动模式。

⑩ 四个自由度，直线运动，非对称运动模式。

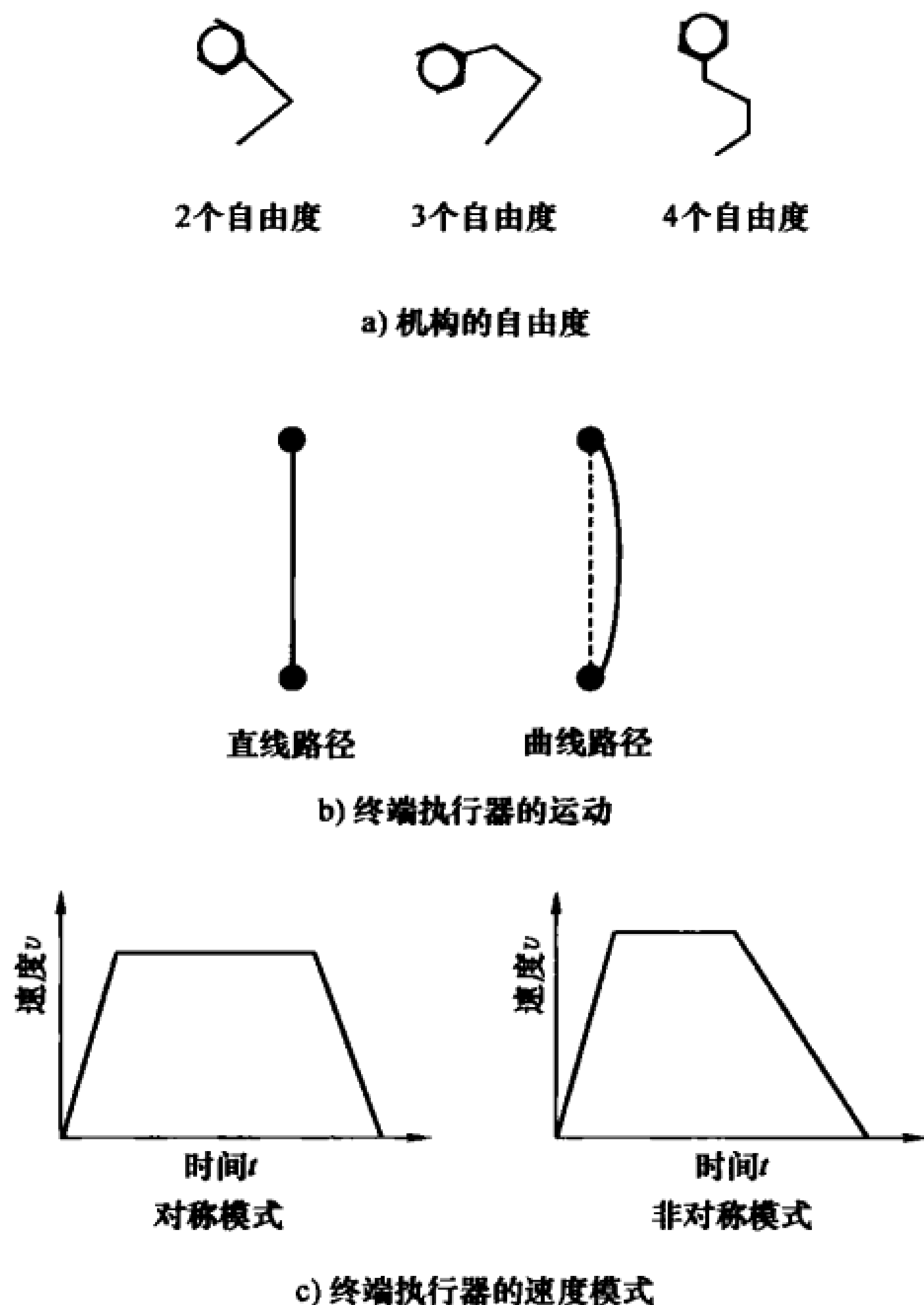


图 4.5　不同类型设计模型的说明

该设计的目标是：良好的可操作性、最大限度地降低产品成本以及感性需求满意度。它要求该机械手在夏天递上冷饮，在冬天递上热饮时的运动能够产生较好的印象。受试人员，即那些正在考虑购买该产品的客户在他们的个人电脑显示器上评价产品的感性特性，并说明他们对机器运动形式的喜好程度。

对产品设计感性知觉的定量评价一般较为困难，形容词词对（Word Pair）[4] 的语义差异法（Semantic Differential Method，SD）常用于衡量人们对给定产品的感觉。语义差异法的具体实施方法如下：

① 第 1 步：准备一组可以表达所要评估产品感性特征的形容词词对。

② 第 2 步：受试人员对每个产品模型进行评价，然后给出每个形容词词对的定量评价结果。

③ 第 3 步：用得到的数据进行主成分分析（Principal Component Analysis），然后选出最能有效表达感性印象的词对，这样就可以做出一张定量表达每种产品模型的感性特征评估图。

表 4.1 所示为 6 个用来评估机械臂运动感性印象的形容词词对。其中，左、右两列的评价词组可以分为 5 段，相应的度量值分别是 -2、-1、0、1 和 2。2 表示机械臂运动的感性印象与右列的形容词高度一致，而 -2 则表示机械臂运动的感性印象与左列的形容词高度一致，0 则表示中立印象。每位受试人员根据屏幕上显示的每个机械手模型的运动形式和相应的词组，输入相应的评价值，并根据他们的感性知觉选出自己最为满意的模型。

表 4.1　6 个用来评估机械臂运动感性印象的形容词词对

X_1	沉重的	灵活的
X_2	简单的	复杂的
X_3	普遍的	独特的
X_4	机械型的	类人型的
X_5	迅速的	缓慢的
X_6	冷淡的（不招人喜欢的）	热情的（招人喜欢的）

用主成分分析法求得每一对形容词的数据。把所得的 6 种主成分表示成 Z_1，Z_2，…，Z_6。表 4.2 所示为每个主成分的特征值和特征向量。特征值表示特征的差异，逐步变大的差异表示该主成分的重要性在逐渐增加。每个特征向量对应有一个感性形容词，表示为 X_1，X_2，…，X_6。特征值之和等于元素的总个数，此处为 6。第一个主成分 Z_1 的贡献率是 60.6% [(3.63633/6)×100%]，第二个主成分 Z_2 的贡献率是 31.0% [(1.86112/6)×100%]，这两个主成分的贡献率总和是 91.6%。由于第一个和第二个主成分在表达感性印象上的贡献率超过了 90%，所以其他主成分可以忽略不计。因此，可以把主成分 Z_1 和 Z_2 分别作为评价图的水平坐标轴和垂直坐标轴，如图 4.6 所示。

表 4.2　每个主成分的特征值和特征向量

主成分	特征值	特征向量
Z_1	3.636	(0.362，-0.492，-0.355，-0.213，-0.494，-0.460)
Z_2	1.861	(-0.456，-0.126，0.505，-0.641，0.00921，-0.329)
Z_3	0.3163	(-0.579，-0.433，0.0831，0.428，-0.473，0.253)
Z_4	0.1261	(-0.411，-0.288，-0.673，-0.207，0.497，0.0674)
Z_5	0.04587	(0.306，-0.661，0.396，0.236，0.507，-0.0116)
Z_6	0.01427	(0.247，-0.187，0.0404，-0.512，-0.169，0.782)

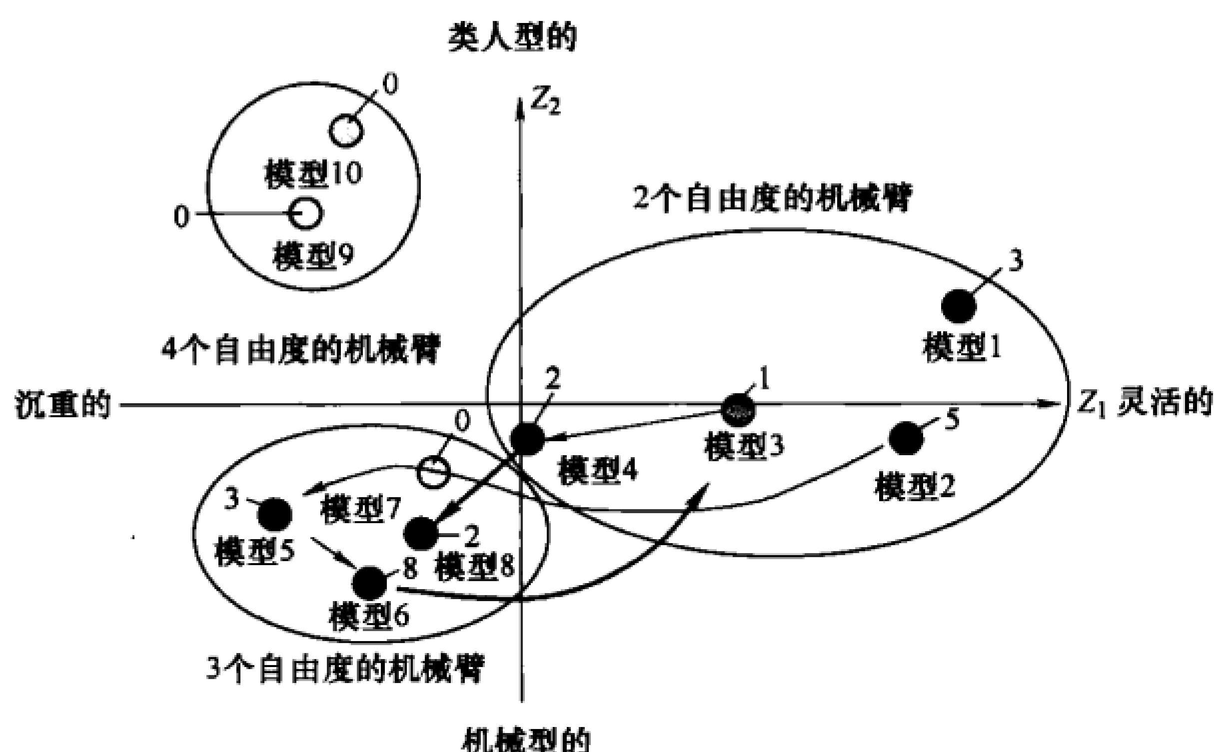


图 4.6 机械臂设计方案评价图

从表 4.1 和表 4.2 可以看出，在 Z_1 的特征向量中，只有 X_1 有正值，它表示灵活的感觉印象；同样，在 Z_2 特征向量中，X_4 负值最小，（Z_2 轴主要表示从类人型到机械型的感觉范围）。然后根据每个产品模型的感觉印象将其定位在空间坐标系中，这样就创建了一张评价图。

图上的每个圆圈都对应一个产品模型。选票的数量是通过问卷调查得到的，它从感性角度出发，确定出了最好的设计方案。我们可以认为，选票的数量与产品模型的受欢迎程度成正比。在图 4.6 中，圆圈的亮暗表示所得选票数量的多少，较暗的圆圈表示选票较多；横轴表示机械臂运动的灵活水平，较大的正值表示灵敏度较高，较小的负值则表明受试人员觉得机械臂的运动比较笨重；纵轴上不断增加的正值表示类人型运动印象百分比的增加，不断变小的负值则表示机械型运动印象的增加。在这些图中，每种模型都有同样的自由度，可以归为一组，也就是说每个模型都有相同数量的手臂段，被一个大圆包围。有 2 个自由度的模型一般较为灵活，有 3 个自由度的模型一般较为机械，而有 4 个自由度的模型的运动就比较类似于人类的运动。通过这张评价图可以看出每个产品模型的感性程度和质量。

图 4.6 中的模型 6 得到了最多的选票，表明它的感性印象最好。这个产品模型是 3 个自由度机械臂，它的起始加速度最大，终端执行器的运动为直线型。选票数位居第二的是模型 2。为了选出最好的方案，不仅要看选票数，还必须考虑设计方案的成本。在评价图上，沿着箭头指示的方向，产品成本逐步增加。两个模型之间箭头的宽度与成本差异的大小成正比。

把模型 i 的感性特征表示为 E_i，成本表示为 C_i。把得票最多，即最受欢迎的

模型命名为 S。把 S 的选票数量和成本分别表示为 E_S和 C_S。沿箭头方向，位于 S 之后的那些模型的成本高于模型 S。出于长远考虑，把这些模型排除在选择范围之外。在模型 S 之前出现的那些模型，成本相对较低，与模型 S 有可比性。因此，同时考虑感性偏好水平和产品成本，在此基础之上对方案进行评价，就可以选出最好的设计方案。

图 4.7 所示为模型 6、5、2 和在模型 6 之前出现的模型 1 的选票数量和产品成本之间的关系。拟合模型 1、2、6 的虚线就是多目标优化问题的帕累托最优解曲线（Pareto Optimum Solution Line），它兼顾了最多选票数和最小成本这两个优化目标。由于模型 5 并不位于帕累托最优解曲线上，所以将它排除在外。考虑虚线上各模型之间的权衡关系，就可以选出最好的模型。以上讨论基于一个事实基础，即客户和制造商协同评价产品的设计方案。

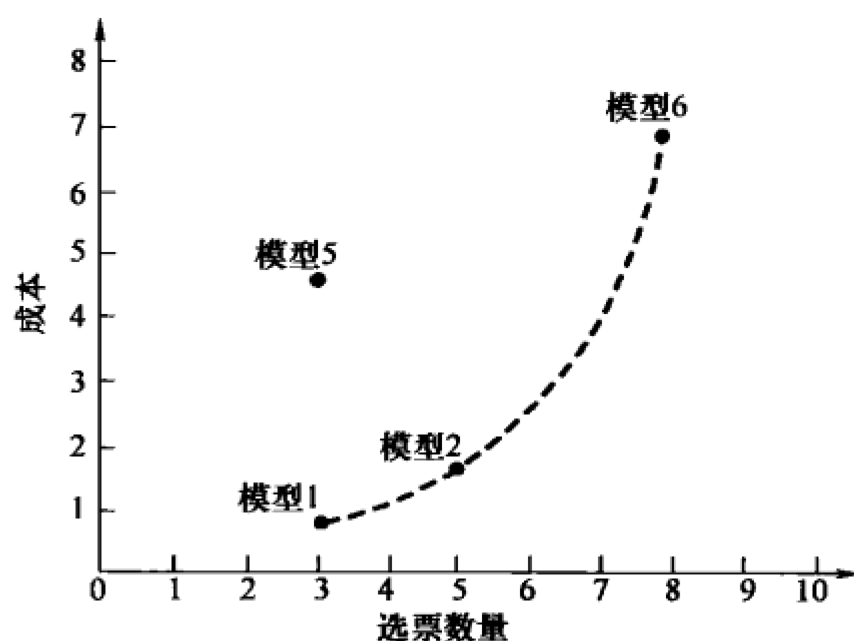


图 4.7 模型 6、5、2 和在模型 6 之前出现的模型 1 的选票数量和产品成本之间的关系

将感性印象和其他常规属性综合考虑的产品设计正变得流行起来，制造商也无法忽视这一点。在这场为客户设计新颖独特产品的斗争中，在技术上对诸如静态位移、产品重量和动态性能这样的客观属性进行定量评估是可行的，但应该将这些内容与主观属性和产品成本限制等条件一起综合考虑。客观属性和主观属性通常是独立评价的。如果产品的客观和主观属性没有任何关系，或者在改进产品的客观属性同时也会提升产品的主观属性，这种独立评价极为有效。然而，当产品的主观属性和客观属性发生冲突时，如设计一款汽车的车身，方案看起来很迷人，但如果要牺牲汽车的室内空间时，就需要同时评价主观属性和客观属性[5]。

此处把工业机器人的模型作为示例，既需要对其静态位移、每级力量的最大振动位移、产品重量和负载能力等客观属性进行评价，还要考虑诸如外观之类的主观属性。设计变量是产品及其零部件的尺寸、整体外形和表面处理等。这样就可以构造出用来表达客观属性和主观属性的满意度。为了得到这 5 种设计变量和外观之间的关系，把每个设计变量分为三个等级，A、B 和 C，如表 4.3 所示。通过这些等级的组合，构建出产品模型的形状，并将其显示在计算机上。受测人员对每个产品模型进行评价，并给出一个等级，范围是从 1 到 10。表 4.4 所示为通过分类变量和评价值大小表示的备选设计方案。然后用数量化 I 类理论

（Type Ⅰ Quantification Theory）的多属性分析方法处理这些数据，这样就可以得到感性满意度函数 u_5[6]。

表 4.3　设计变量的分类变量值

设计变量	分类		
	A	*B*	*C*
X(1)	1.0	1.4	1.8
X(2)	0.1	0.25	0.4
X(3)	1.0	1.5	2.0
X(4)	1.0	1.4	1.8
X(5)	0.0	0.5	1.0

表 4.4　通过分类变量和评价值大小表示的备选设计方案

备选设计方案	设计变量					评估值大小
	X(1)	*X*(2)	*X*(3)	*X*(4)	*X*(5)	
1	*C*	*A*	*C*	*C*	*A*	1
2	*B*	*B*	*B*	*A*	*A*	4
3	*A*	*C*	*A*	*B*	*A*	6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	*A*	*B*	*B*	*B*	*C*	9

为了定义各属性的权重系数，需要受测人员对属性进行配对比较。在这个例子中，可得到以下权重系数：静态位移 $\omega_1=0.3437$、最大振动位移 $\omega_2=0.0681$、产品重量 $\omega_3=0.1339$、载荷量 $\omega_4=0.1369$、外观 $\omega_5=0.3173$。那么，对客观属性和主观属性进行综合评价的函数 U_0为

$$U_0 = \sum_{i=1}^{5} \omega_i u_i$$

如前所述，为了得到能让客户产生最高满意度的设计方案，必须综合考虑产品的客观属性和主观属性。有时人们会说，因为感性印象是主观的，所以整合感性印象的设计可能会不可靠。虽然表示人们主观评价的数据看起来比较分散，但还是有可能从中提取与产品设计相关的共同点或者共性的东西。如果产品设计的目标重点在于特定的客户群体，感性评价就可以为产品的设计决策提供强有力的支持。

4.3　人机工程学

人机工程学主要关注实用性、舒适性、安全性以及在人们使用不同产品时，

如何将疲劳和不舒适度降到最低等问题。如何提高用户的满意度，是产品设计需要考虑的一个重要方面[7,8]。这就意味着在设计为人所用的产品时，应该深入考虑人的生理和心理特征。本书主要考虑人机工程学的两个应用领域：产品制造过程中的人机工程学，主要用来评价制造过程中工人的舒适度；由产品的潜在客户评价的人机工程因素。

图4.8所示为综合了人机工程学的产品设计流程。图1.2给出了符合标准人体尺度的产品规格。在设计人类使用的产品时，确定适当的尺寸是一项基本要求，因为它在很大程度上影响着产品的可用性。很多度量单位都源于人的身体或某个部分，例如脚就对应于日语中的“shanku”。按照人机工程学的基础理论来说，基于人体尺寸来确定人机工程产品的尺度是非常实用的。

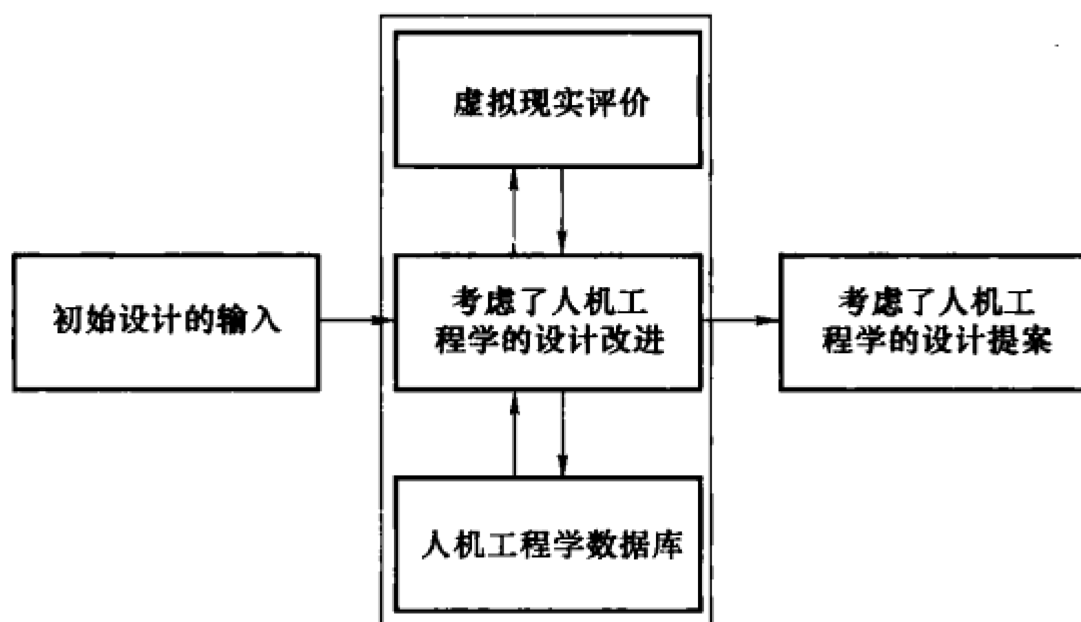


图4.8　综合了人机工程学的产品设计流程

图4.9所示为叉车的操作。在设计由工人控制和操作的产品时，用来控制和实施各种装卸任务的零部件位置、形状、踏板角度及保持清晰视线所要求的杠杆高度等，都必须尽可能达到使工人最舒服的程度，并尽量减少工人的不适和疲惫感。

良好实施人机工程理论的重要产品设计标准包括动作经济原则（Motion Economy），由以下10个指标组成：

① 最小化运动距离。

② 基于自然运动调整运动方向。

③ 避免突然改变方向，提倡光滑或流畅的运动。

④ 尽可能同时使用双手。

⑤ 使用双手进行操作时，应设计成对称或匹配运动。

⑥ 减少基本移动类型的数量。

⑦ 选择合理的运动顺序。

⑧ 保持适当的运动速度。

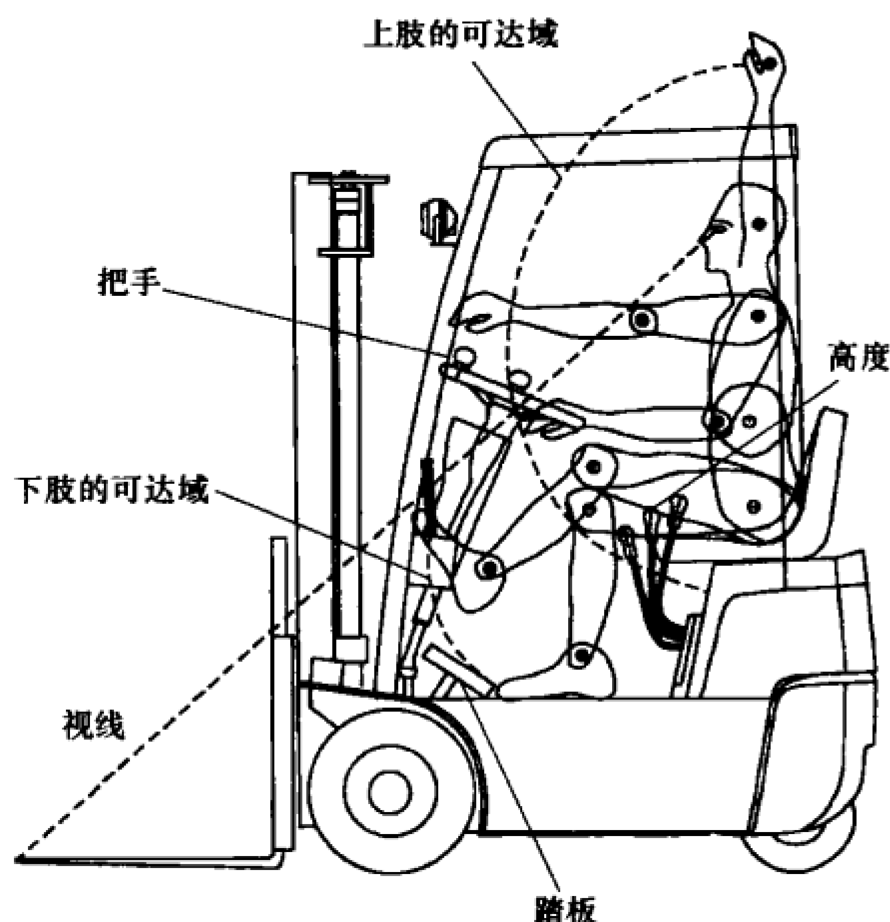


图4.9 叉车的操作

⑨ 消除不必要或多余的重复运动。

⑩ 在可能的情况下，将独立的运动合并成一个运动。

在操作叉车工作时，操作人员的四肢、手臂、脚和手的肌肉会配合运动，以便能够操纵踏板和杠杆的运动来完成各种机械任务。人体中通常会有数块肌肉相互配合来完成运动并实现对每个关节的控制。不同的肌肉发挥自身的功能，相互合作才能实现复杂的关节运动和灵活的运动控制。各种肌肉力量需要相互结合并以有序的方式进行调节，可以根据特定的标准来确定类似规则[9]。

在最小化体力消耗的目标下，模拟各种肌肉力量的作用过程，求解能量消耗的最小值优化问题，就可以估算出所需的肌肉力[10]。对于确定最小化工人操作机器时疲劳的运动路径，基于优化过程的分析非常有效[11]。

根据沿各种路径的外施力大小的不同，肌肉运动时所消耗的能量会有所不同，腿、胳膊以及身体的其他部位通过移动完成任务所需的能量消耗也有所不同。机器的位置、阻力和踏板及杠杆的运动行程都是重要的设计因素，这些因素会影响司机操纵机器时所耗费的能量。人体消耗的能量可以用肌肉的截面积、长度、收缩速度和所施外力等因素表示。通过减少肌肉和关节运动所消耗能量的和，可以确定腿、胳膊、手以及其他部位的最佳运动路径和速度。

图4.10所示为人体上肢肌肉骨骼模型。每一块肌肉附着点处的骨骼都是基于人体解剖学确定的，但实际上，有些肌肉附着点会有所延伸。为简化这一问题，把这些附着区域建模成多个点，忽略控制手指运动的肌肉。肢体的上半部分

用 30 块带有编号的肌肉表示。

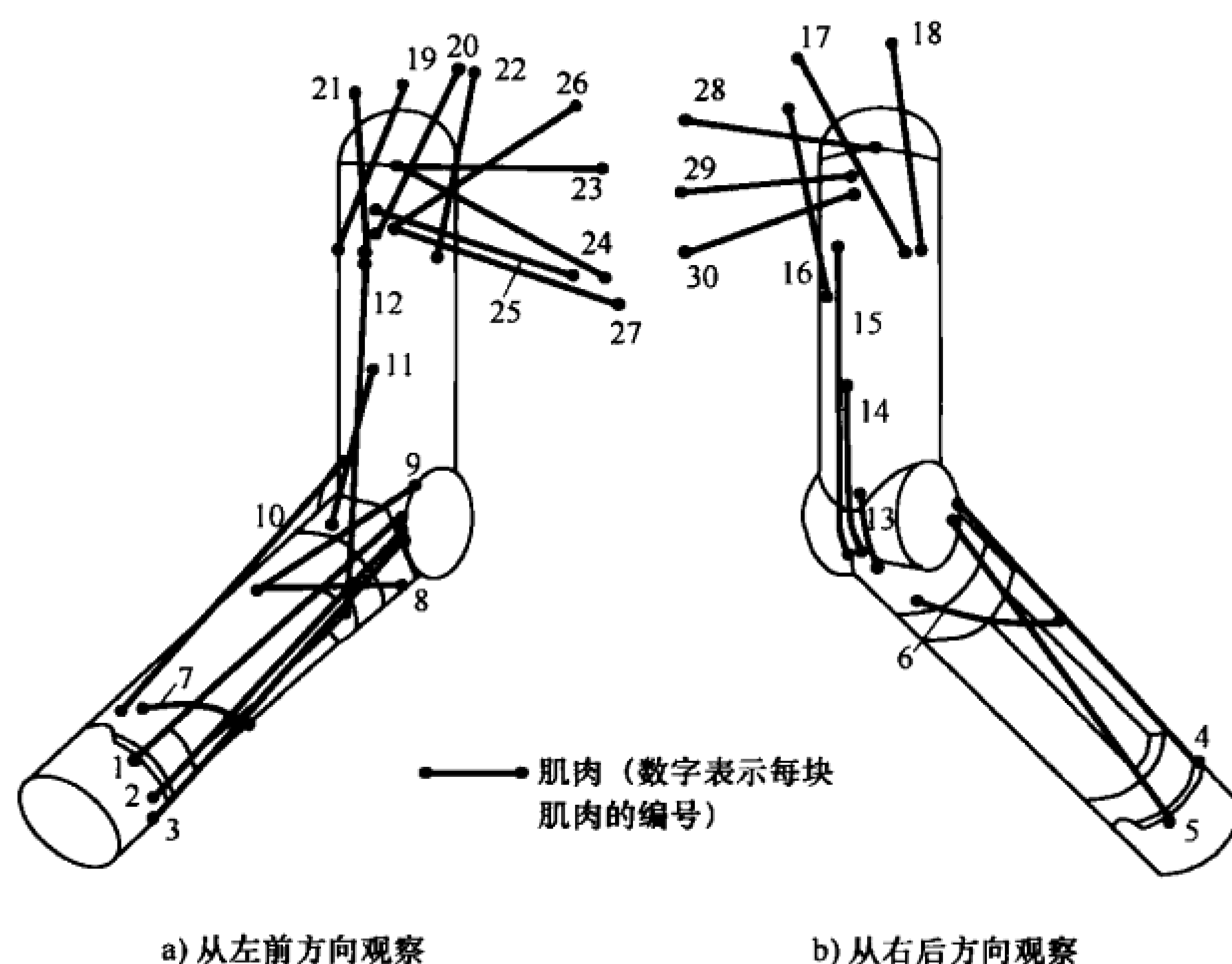


图 4.10 人体上肢肌肉骨骼模型（线条表示肌肉，数字是肌肉的编码）

人的手臂可以实现各种类型的运动，如抓取零件，并将其移动到目标点处。图 4.11 所示为通过手臂运动完成某一任务的例子。图 4.11a 所示为 *A* 运动的模拟，抓握一个零件，将其按压在墙的表面上。如图所示，所要抓握零件是立方体，边长 6cm，质量为 0.1kg，对墙施加的操作力是 50N。通过求解表 4.5a 中的优化问题，可以得到肌肉力的作用效果。图 4.11b 所示为 *B* 运动，图中给出了两类转矩的仿真示意效果：绕手部的中心轴分别施加 +50N · cm和 −50N · cm 的转矩，对应螺钉的拧紧或松动过程。该仿真的计算结果显示在表 4.5b 中。

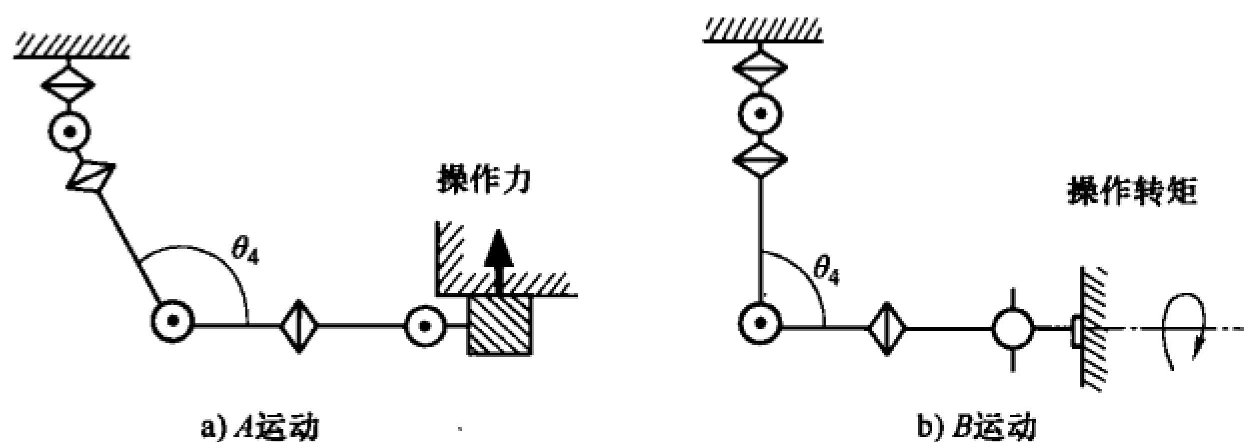


图 4.11 通过手臂运动完成某一任务的例子

表 4.5　用于静态运动时的肌肉力量估算结果

a) *A* 运动		b) *B* 运动		
肌肉	肌肉力/N	肌肉	肌肉力/N	
			转矩 50N · cm	转矩 50N · cm
1	86.25	1	0.0	0.0
2	85.86	2	0.0	0.0
3	89.35	3	0.0	0.0
4	0.0	4	0.0	0.0
5	0.0	5	0.0	0.0
6	35.60	6	9.16	0.0
7	0.0	7	0.0	22.45
8	0.0	8	0.0	19.90
9	45.88	9	0.0	10.27
10	74.54	10	2.60	0.0
11	216.36	11	8.69	23.21
12	206.66	12	15.40	0.0
13	0.0	13	0.0	0.0
14	0.0	14	0.0	0.0
15	0.0	15	0.0	0.0
16	0.0	16	0.0	0.0
17	0.0	17	0.0	0.0
18	173.18	18	2.13	13.02
19	153.89	19	9.24	14.55
20	60.64	20	8.02	1.75
21	260.98	21	10.27	28.40
22	129.56	22	11.13	0.48
23	0.0	23	0.0	0.0
24	0.0	24	0.0	0.0
25	0.0	25	0.0	0.0
26	0.0	26	2.76	0.0
27	0.0	27	0.0	0.0
28	0.0	28	0.0	0.0
29	0.0	29	1.66	0.0
30	0.0	30	1.06	0.0

在运动完成后处于最佳姿态，也就是肌肉消耗能量最少的姿态的设计方案是最优方案。通过再次求解优化问题，可以确定肘关节的运动角度。能够返回目标函数最小值的情况是最佳姿态。对于图 4.11a 中的 A 运动来说，肌肉运动所消耗的总能量经计算后，得到的肘关节角度 θ_4 和肌肉消耗的总能量目标函数 ψ 之间的关系曲线如图 4.12 所示，可以从这些结果中得出最佳姿态。也就是说，肘关节角度约为 120°时的能量消耗最低，也就是目标函数的最小值，这一姿态就是最佳姿态。

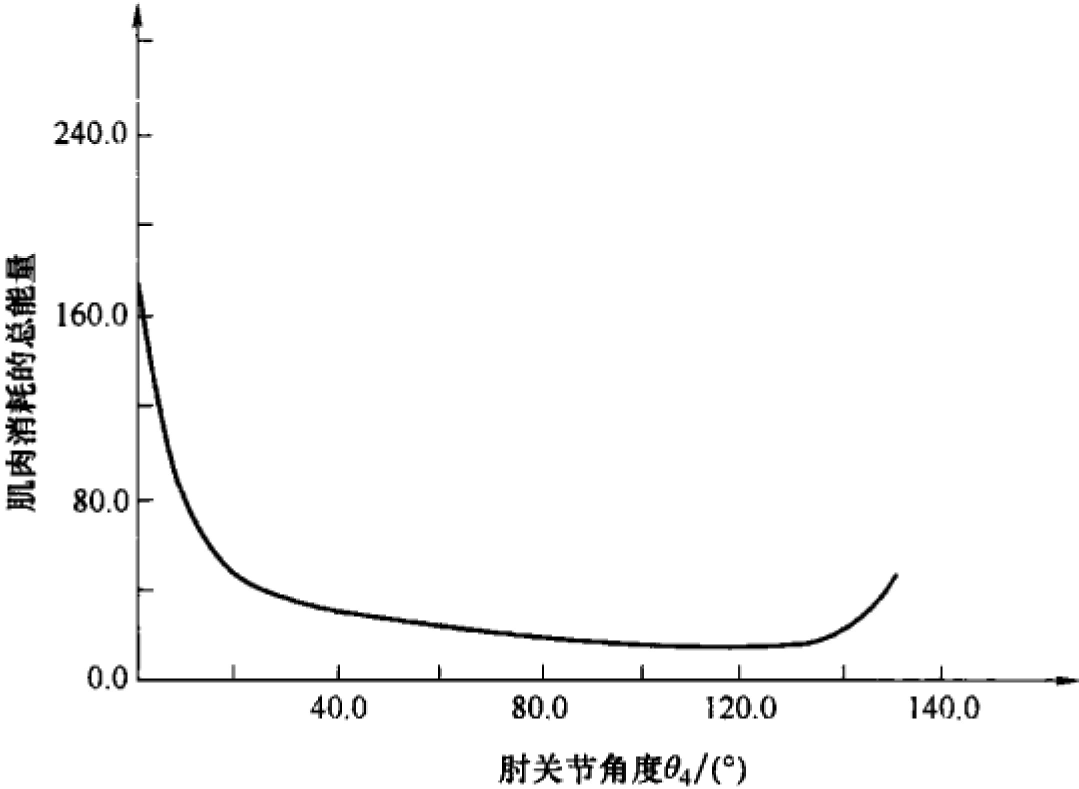


图 4.12　肘关节角度 θ_4 和肌肉消耗的总能量目标函数 ψ 之间的关系曲线

4.4　协同环境

第 3 章对“协同”的概念进行了阐述，这为通过传统产品制造方法获得圆满解决方案提供了重要的思路，但必须要有适当的协同团队成员。如果各成员在知识、专业基础或其他方面配置不当，那么即使他们对于要达成的目标具有很大的热情，合作的成功概率也会很低。本章讨论协同环境，特别是对具体产品开发项目中的人力资源（Human Resource，HR 即劳动人员）配置进行优化的问题。

图 4.13 所示为某公司的组织架构。每名 HR 通常都在其力所能及的单一环节（Section）内开展工作。通常把这些环节称为部门（Division），它们包含了垂直管理架构，其中的 HR 会在不同层级内完成任务。当某个产品开发项目需要特定的小组成员时，可以跨部门选择人员，并根据具体要求将其

组合在一起，以尽可能好地完成项目目标。每个部门经理通常都会考虑 HR 的职场经历，并根据他们的业务能力来选择用人，根据需要从不同的业务部门中将 HR 召集在一起。通过这种方式，就可以把不同领域内的专家以横向组织结构的形式组织起来。

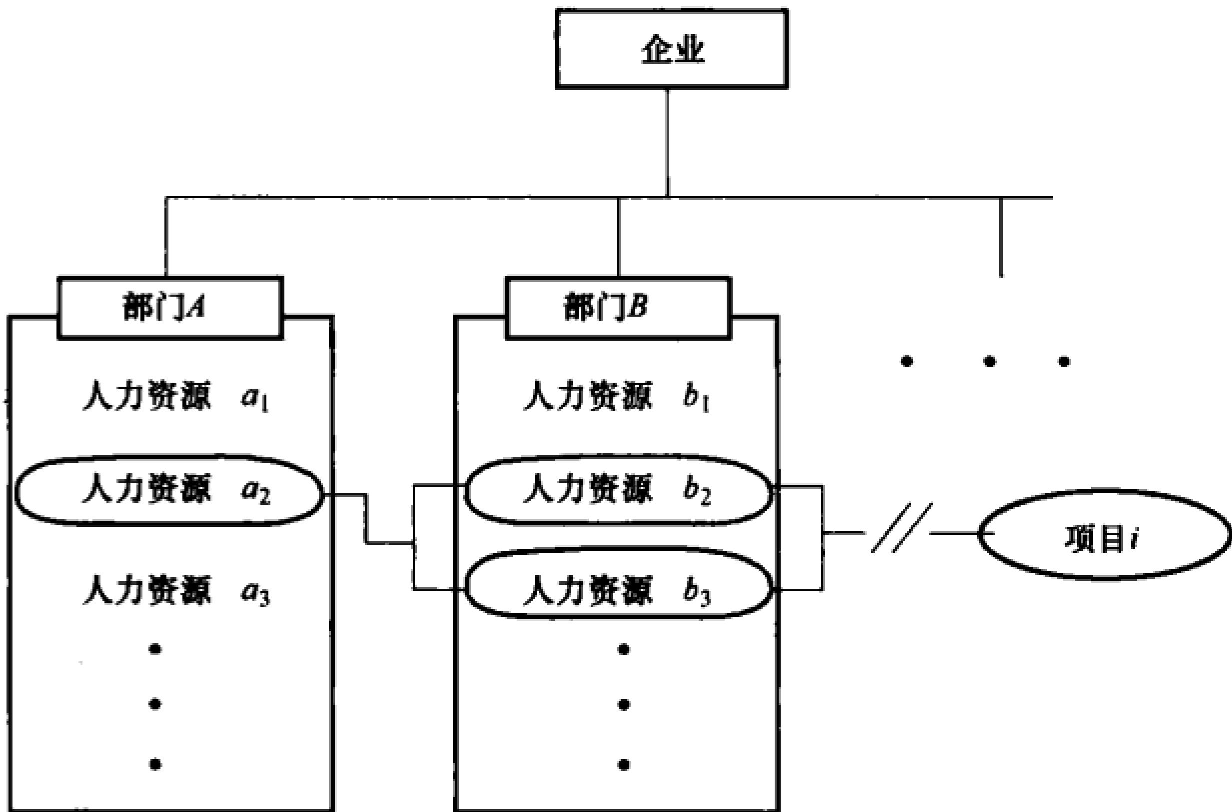


图 4.13 某公司的组织架构

从逻辑上讲，一个项目中的人员优化配置不仅取决于工人的技术知识和能力，还取决于他们的能动性、职业经历以及他们在组内的人缘关系。如何处理这些因素，并根据这些关系制订出更有效的优化过程是一项重要的技术课题，在必须把定性评估转变成定量评估时更是如此[12]。下面用一个例子说明这一问题。

在某些公司中，一些 HR 会被分配到多个项目中。例如把 HRj 分配到项目 i 的比例计作 x_{ij}，表示他每单位工时的参与率。为简单起见，此处使分配率等于 HRj 分配给项目 i 的技能比例。HRj 在所有项目中的 x_{ij}之和等于 1。

对于每个项目，可以把 HR 在本项目中分配的技能与规定周期内完成该项目所需的技术之比表示为技术满意度目标函数f_1，要尽量使该函数实现最大值。可用技能的缺失会对项目的可行性产生极大的影响，因此在优化人力资源配置时，f_1就是最重要的目标函数。

对于技能 k，把 HRj 的能力分为四个层级：{0，0.5，1，2}。“2”表示对于当前的任务而言，HR 们拥有足够的知识和经验，可以相互学习；“1”表示拥有一定的知识和经验；“0.5”表示只有基本知识，没有什么经验；“0”表示没有知识和经验。表 4.6 所示为 HR 的技能矩阵。

表 4.6 HR 的技能矩阵

	技能 1	技能 2	技能 3	技能 4
HR1	2	0	0.5	0.5
HR2	1	1	0.5	0
HR3	0.5	0	2	1
HR4	1	1	1	2
HR5	2	2	0	2
HR6	0.5	0.5	1	0

根据每个人的职业经历不同，各部门的经理通常对其下属应该掌握的其他技能有一定的了解，此处称为“需要提升的技能”。当项目的 HR 分配问题中包括有所需提升技能问题时，可以把部门经理对属下职业生涯经历的满意度定义成目标函数 f_2，这样有利于最大限度地发挥 HR 的能力。这类满意度的值都位于 0 ~ 1 之间，如表 4.7 所示。数值的差异表示各 HR 职业经历的满意度不同。

表 4.7 HR 职业经历的满意度

	项目 1	项目 2	项目 3	项目 4
HR1	1	0.25	0.25	1
HR2	0.25	1	0.5	0.25
HR3	0.5	0.25	1	0.75
HR4	0.75	0.5	1	0.5
HR5	0.25	0.5	0.5	1
HR6	1	1	0.75	0.25

项目人员参与项目时的主要动机因素包括：参与项目是为了获得新技能还是为了提高现有技能的水平，另外还包括影响工作环境的人际关系。项目参与者对所获技能的满意度可以用 0 ~ 1 之间的数值表示，值越大越好，如表 4.8 所示。同样的方法可用来表示工作环境中与人际关系相关的满意度，如表 4.9 所示。如果某个 HR 在同一项目上与其伙伴有过合作经历，那么与该伙伴协同工作的满意度就可以根据两者的配合程度进行判断。在缺乏合作经验时，满意度，就可以取中间值 0.5。总结上述两项满意度，就可以定义出激励目标函数 f_3，要使该函数实现最大值。

表 4.8　项目参与人员对技能获取的满意度

	项目 1	项目 2	项目 3	项目 4
HR1	0.75	0.25	0.5	1
HR2	0.25	1	0.5	0.5
HR3	0.25	0.25	1	1
HR4	1	0.75	1	0.5
HR5	0.25	1	0.25	0.75
HR6	0.75	1	0.5	0.25

表 4.9　关于工作环境中与人际关系相关的满意度

	HR1	HR2	HR3	HR4	HR5	HR6
HR1	—	0.75	0.5	1	1	1
HR2	0.75	—	1	0.5	0.5	0.5
HR3	0.5	1	—	1	1	0.75
HR4	0.5	1	0.25	0.5	0.5	0.25
HR5	1	0.5	1	—	—	0.75
HR6	1	0.5	0.75	0.75	0.75	—

将上述三个目标函数$\{f_1, f_2, f_3\}$结合起来，就构成了一个多目标优化问题。求解其帕累托最优解集（Pareto Optimum Solution Set），决策者就可以从中选择一个最合适的解决方案。即使表 4.6 ~ 表 4.9 和优化方程中的初始数据不足，也可以通过评价并重新考虑已经获得的结果来改进模型，以便为 HR 的分配决策提供所期望的支撑，特别是在经过多次试验之后，这种方法所能带来的效果更明显。

思考题

4.1　试论人的天生能力在产品设计和制造中的重要性。

4.2　举些例子说明感性需求和产品性能、功能需求之间的矛盾关系。

4.3　简要说明为什么良好的协同关系在产品制造中十分重要。

4.4　当从水平架构的各部门中为某项目挑选组员时，需要考虑哪些因素？讨论这些因素的重要性。

4.5　就最佳解决方案之间的区别，试论项目合作中人的积极和消极协同态度对协同结果的影响。

4.6　试论用于产品设计的人体尺寸和使用这些产品时所获得的舒适度或者人机工程学之间的关系。

参考文献

1. Nagamachi M (1995) Kansei engineering: A new ergonomic computer-oriented technology for product development. International journal of industrial ergonomics 15:3–11
2. Yoshimura M, Papalambros PY (2004) Kansei engineering in concurrent product design: A progress review. In: Proceedings of the TMCE2004, p.177
3. Yoshimura M, Horie S (2001) Aesthetic design of machine systems using evaluation maps. In: Proceedings of DETC' 2001: ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferences, Pittsburgh, DETC2001/DAC-21154:1–9
4. Osgood CE, Suci GJ, Tannenbaum PH (1957) The measurement of meaning. University of Illinois Press
5. Yoshimura M, Yanagi H (2001) Strategies for implementing aesthetic factors in product design. International journal of production research, 39(5):1031–1049
6. Hayashi C (1950) On the quantification of qualitative data from the mathematico-statical point of view. Ann.Inst.Statist.Math.:35–47
7. Galer I (ed) (1987) Applied ergonomics handbook. Butterworths, London
8. Chapanis A (1996) Human factors in systems engineering. Wiley, New York
9. Penrod DD, Davy DT, Singh DP (1974) An optimization approach to tendon force analysis. J. Biomech. 7:123–29
10. Crowninshield RD (1978) Use of optimization techniques to predict muscle forces. Trans. ASME , J. Biomech. Eng., 100:88–92
11. Yoshimura M, Masui H (1992) Prediction of muscular force sharing in a human upper limb and determination of optimal limb motion. JSME international journal, 35(330) C:574–581
12. Yoshimura M, Fujimi Y, Izui K, Nishiwaki S (2006) Decision-making support system for human resource allocation in product development projects. International journal of production research, 44(5):831–848

第5章　产品制造的支撑技术

在制订决策的过程中，虽然可以利用有用的感性信息和量身订制的制造能力，但由于受大量评价因素、产品特征和设计变量的共同影响，仍然难以制订出最佳的决策。这就需要一些能够广泛支持人类的各种能力，并方便他们充分表达观点，容易使用的支撑系统。本章将介绍这种技术支撑系统的一些特征：产品形态描述技术、性能特征分析技术、产品设计创意支撑技术、数据库技术、制造支撑技术、客户需求信息获取技术和企业管理支撑技术等，另外还将讨论信息网络系统的重要性，因为这些系统和技术在优化产品设计和制造的决策过程中发挥了至关重要的作用。

5.1　典型的支撑系统

在产品制造中支撑决策制订的主要技术如图5.1所示。决策制订过程中的重要因素位于该图的中心，它代表着产品制造过程中每个阶段所要实现的目标；距离图中心最近的圆圈内是各种优化方法和决策支撑方法；较远的圆圈中则是网络信息系统、共享的数据库以及那些内部决策过程所依赖的虚拟现实技术（Virtual Rality，VR）；核心区域之外依次是一系列支持复杂产品生产的技术，并在最外围的圆环中分别用一些不同的类别予以标注。随着时间的推移，为了更快捷地制订出更好的判断和决策，也为了让决策结果更真实地反映相关人员的能力、个性和感性信息，人们开发出了一些技术。下面将逐一论述这些技术。

5.1.1　产品形态描述技术

1. 实体造型技术

图5.2所示为产品制造流程中的计算机辅助技术。在现代产品制造中，用计算机可以处理的数据表达和解析工件或产品零部件形态是最重要的一项技术。

实体模型（三维模型）以数字化的形式描述零件和产品的形态，它已经彻底改变了产品设计和制造过程的各个方面，使人们不但能够迅速了解要制造的产品形态细节，评估诸如产品重心这样的物理特性，而且还能为CAM信息的输出、制造零部件的自动测试等提供便利。以三维形式显示的产品和零部件比平面图样更易于理解，降低了在传输产品形态信息的过程中产生误解的概率。

产品设计阶段所需或产生的CAD数据可与制造过程直接关联，这样可以降低制造残次品或错误产品的风险，还可以在较短的时间内提升获得更高质量产品

制造支撑
产品形态描述
质量设计
实体造型
调度、生产规划
数字样机
网络信息系统
模块化设计
快速成型
常规数据库
决策支撑方法
决策
优化方法
虚拟现实技术
QFD
计算机辅助工程结构分析
客户需求信息获取
性能特征分析
感性信息处理系统
仿真
ERP
PDM、TRIZ
支持分类创意构思的系统
企业管理支撑
产品设计创意支撑
数据库

图 5.1 在产品制造中支撑决策制订的主要技术

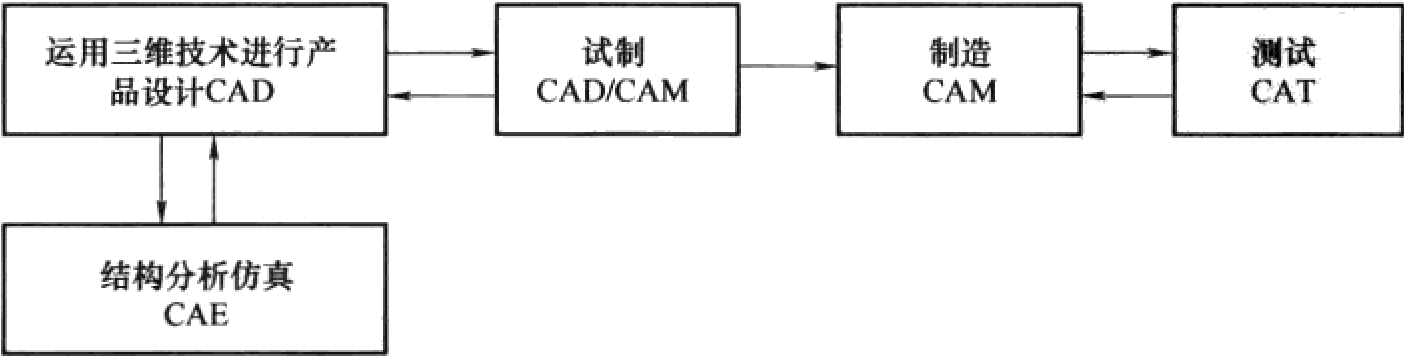


图 5.2 产品制造流程中的计算机辅助技术

的概率。此外，对 CAD 数据和产品制造数据进行比较分析，使得对产品质量进行自动测试的 CAT（Computer- Aided Testing）技术成为了可能。将该技术运用于早期的产品生产阶段，可以暴露质量残次品或不合格零部件的生产问题，也可以把影响平稳运行的故障信息反馈到之前的生产过程中。简而言之，各种检测结果

都能够提前起到作用，这有利于实施第 3.3 节中介绍的并行工程（Concurrent Engineering）。早期阶段，在整个企业内共享 CAD 数据可以发现并解决各种设计问题和缺陷。使用三维 CAD 流程所能获得的最大优点就是它不但可以降低产品制造成本，还可以缩短开发周期。

理想情况下，产品的制造需要依靠统一的数据集。该数据集包含了产品的设计、分析、制造、检测以及类似于产品和零部件形状这样的数据，这些数据都以数字化的形式表示，这一技术称为数字工程（Digital Engineering）。并行工程和协同工作中的设计和制造信息已经可以在相关的人群中可视化地、非常方便地传输、交流。为了从中获得最大效益，数字工程正在逐渐成为最关键的要求条件。

2. 数字样机技术

数字样机（Digital-Mockup）技术可以把那些显示在计算机屏幕上的零部件装配起来。这种模拟实际生产过程细节的装配模型样机使快速决策成为可能。基于对所显示产品模型的检查，可合理化试制过程，并可在完成产品设计后更为迅速地开展实际的产品制造。

3. 快速成型技术

快速成型（Rapid Prototyping）技术可以让产品原型与要迅速制造的潜在产品具有相同的形状[1]。这些原型或许和最终的实际零部件采用不同的材料，但却基于相同的 CAD 数据。这一点特别有用，因为人们可以通过它检查零部件的设计是否得当，它也有利于发现需要改进的设计和制造问题。实际零部件的试制通常既耗时又费钱，而快速成型技术正好克服了这一缺点，所以它越来越受欢迎。图 5.3 所示为光固化快速成型技术的流程，流程中实际使用的是一种类似于三维激光打印机的设备。由此获得的原型部件与设计零部件在形状和特征上非常接近，远胜于三维屏幕的显示效果，它可给予设计人员直接的视觉和触觉反馈。也就是说，快速成型技术的主要优势在于它使得人们不仅可以从视觉感官方面对设计进行评价，还可以通过触觉进行评价。

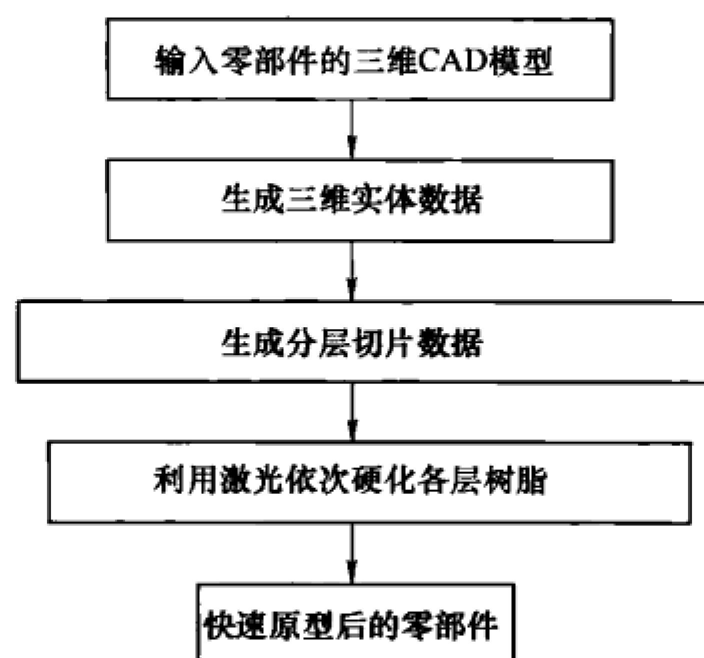


图 5.3　光固化快速成型技术的流程

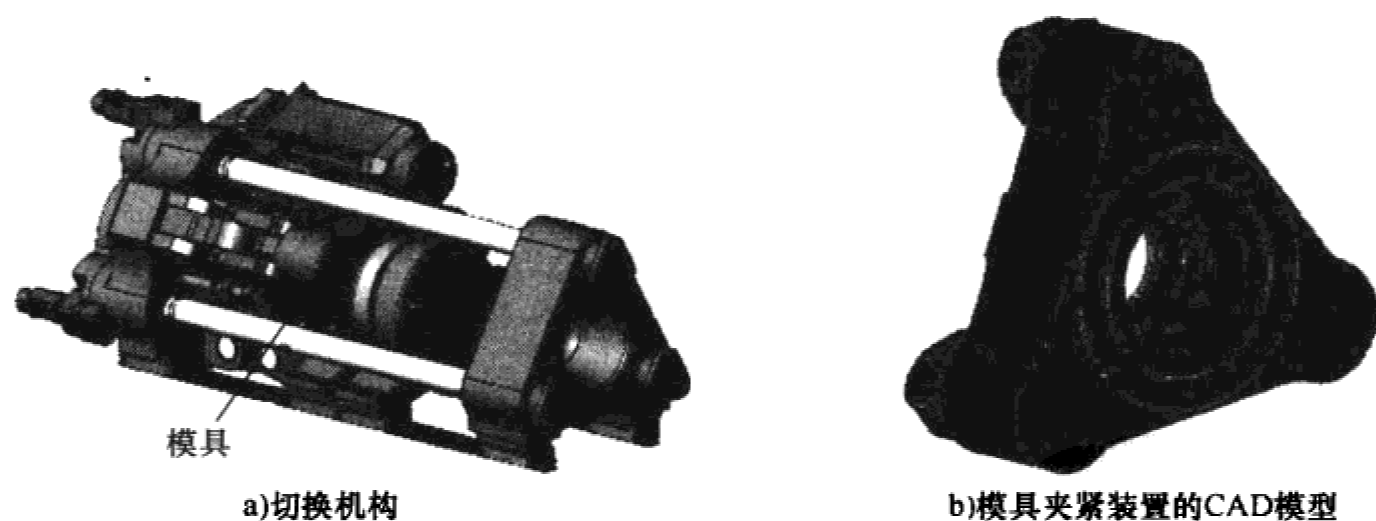
5.1.2　性能特征分析技术

诸如有限元法的结构分析方法可使用计算机软件对产品在其运行状态的动态特性进行分析，能准确地计算应力、振动、热变形、流体动力学和电磁行为等，

这样就可以在设计阶段构造出更好、更实用、更复杂的产品结构。产品性能分析和各种联合仿真技术统称为 CAE（Computer-Aided Engineering，计算机辅助工程）。美国辛辛那提大学的副教授 J. R. Lemon 在 1980 年首次提出了 CAE 的概念[2]。当时，他正在做机床的结构振动分析。他创办了结构动力学研究公司（Structural Dynamics Research Corporation），该公司在当时是一家领先的工程咨询公司。

有限元方法（Finite Element Method，FEM）是一项应用最为广泛、使用计算机仿真技术在设计阶段获取产品各种动态特性的技术。使用这一方法，人们可以准确地在设计阶段获得零部件和机构的特性。基于有限元法的产品仿真技术在寻求产品更优方案、优化产品设计方案并降低试制需求时特别有效。然而，在处理机械产品中的接触铰链、摩擦动力学、非线性特征和磨损等目前仍缺乏足够理论支持的问题时，FEM 技术存在明显的不足。因此，在 CAE 领域里尚有许多问题需要解决。

图 5.4b 所示为图 5.4a 中注塑成型机模具夹紧装置的 CAD 模型。切换机构会控制该夹紧装置的开、关状态。把 CAD 模型转换成 CAE 模型，就可以对静态特征和动态特征进行分析，而且还可以在保持其原有的刚度系数、最小化结构重量的前提下对夹紧机构的形态进行优化，提高夹紧机构的动态性能并降低其材料成本。图 5.5 所示为模具形状的优化结果。



a)切换机构　　b)模具夹紧装置的CAD模型

图 5.4　注塑成型机上的切换机构和模具加紧装置

这一形状优化过程用到了牵引法（Traction Method）[3]。此方法的一个优点是可以在表面形状的优化过程中避免经常出现的波浪变形现象，并且这种优化的结果可以很容易地应用于实际的制造工艺。在优化过程中，外力将垂直作用于图 5.6a 中所示的模具区域。需要建立一个变形约束，将其作为形状优化的边界条件，这样可以保证在装配过程中，零件的形变不会影响到其他已装配零件的位置。图 5.6b 所示为保证装配的孔约束，孔用于安装开关转换装置，并防止过度变形。通过这种形状优化，模具的重量在原有设计的基础上减少了 16.7%。在经过形状优化后，还可以继续考虑其他特定的制造条件，进而修改 CAE 模型。

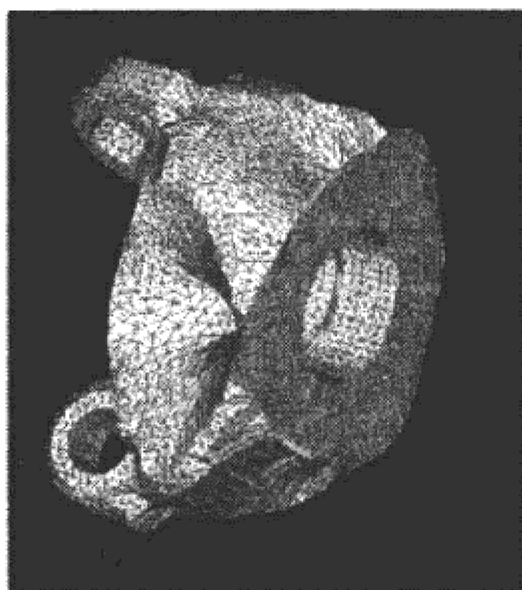
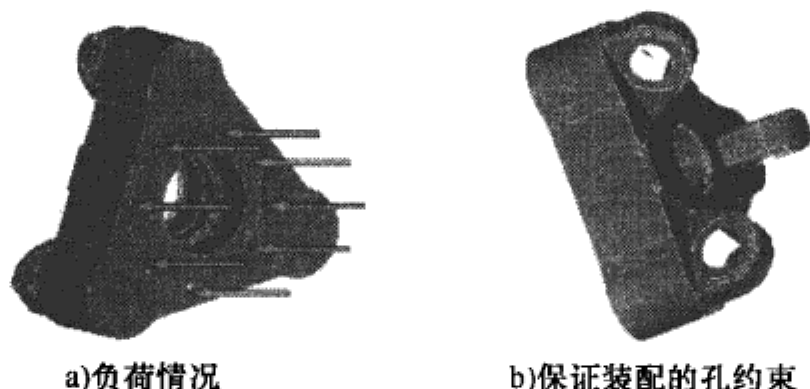


图5.5 模具形状的优化结果



a)负荷情况　　b)保证装配的孔约束

图5.6 零件负荷与形状约束

5.1.3 产品设计创意支撑技术

如第3.4节所述，协同的主要特点在于小组成员可通过大家的知识、信息和思想合作共同实现某个目标。有效协同提供的优势并不仅仅局限于扩大参与人员所组成的可用知识和信息规模，它还能扩展到协同成员之间的相互影响和刺激，这样就可产生出新的解决方法，也就是所谓的协同效应（Synergy Effects）。头脑风暴[4]或许是最著名的方法，它能为创新团队提供技术支撑。由Kawakita开发的KJ法不但为个人，也为团体的创造性行为提供了支撑[5]。在KJ法中，参与者将自己的想法写在卡片上，并根据模拟参与者创意过程的规则重新排列这些卡片。

人们会不断回忆各种信息片段，并从他们所处的周围环境中获取新鲜的事物。当人们竭力创造新的想法或改善现有想法时，会利用各式各样的信息，如过去的知识、最近的经验、意想不到的一些见解等等。所有这些信息的汇总就提供了丰富的、可以触发灵感的潜在关系并激发创造性灵感，使其转变成新的设计想法。这种现象被称为链反应过程（Chain Reaction Process）。产生灵感或新想法只是第一步。最初的灵感或想法就像粗糙的石头一样，还需要额外的处理、细化和打磨，使其最终达到可用的水平。这种带着最初的、半成型的想法并将其发展成某些有用东西的过程称为提炼（Refinement）。

创新过程可以表示为上述两个子过程的一系列循环过程。在典型的循环中，参与者会在链反应过程中产生新的想法，然后进行提炼，把它发展成更为成熟的实体[6,7]。

图5.7所示为包含链反应和提炼过程的创新性群体活动。创新性群体需要不断重复连锁反应和创新提炼过程。在创新性群体活动中，各类信息会在群体成员之间以一对一、一对多的形式往复地流动。这种信息流会激发成员的创造力，并使他们产生新的灵感和创造性思维。当群体中的成员提出一种新想法时，所有的成员对其进行讨论，并进一步开发和提炼，使其变得更加成熟。基于创新性群体

过程的这种基本模式，可以构造出协同设计过程的可视化流程。

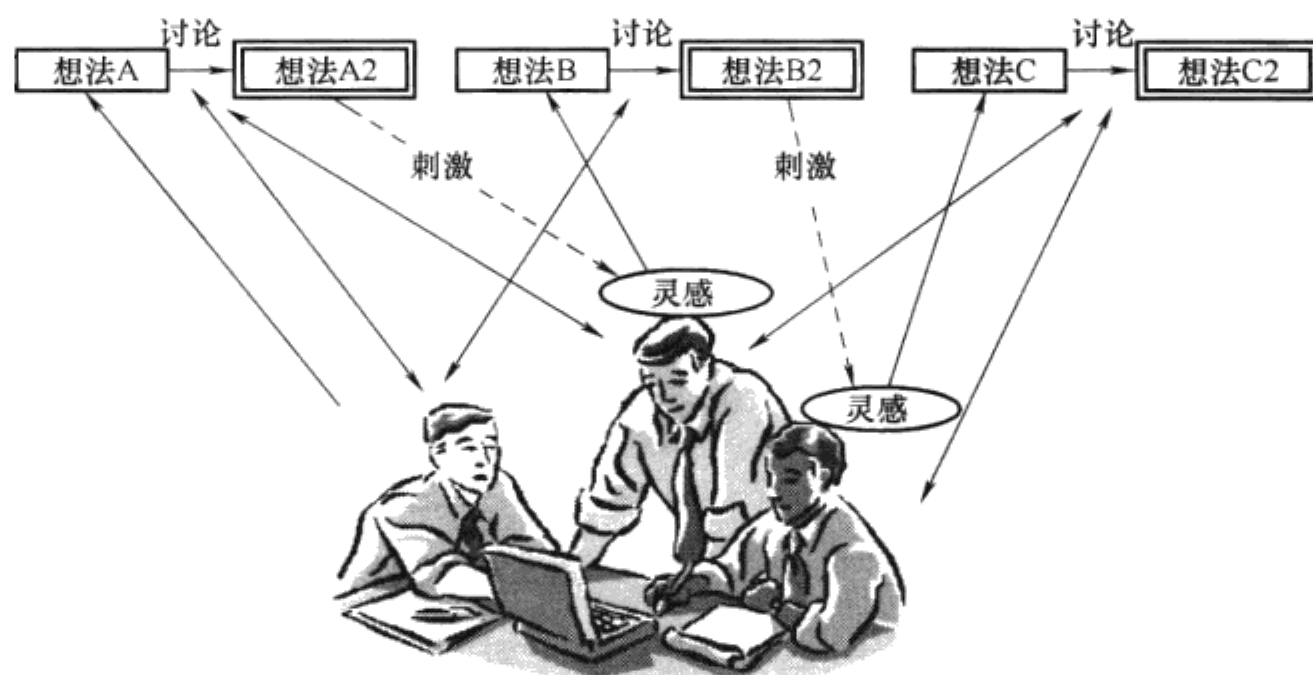


图 5.7　包含链反应和提炼过程的创新性群体活动

为了构建一个互通的流程，并在协同设计过程中可视化地表示和呈现设计创意，需要定义一种创新性活动基本单元——会话（Session）。每个会话都由一个简单的发起动作（Initiating Action）和几个后续动作构成，前者称为触发动作（Trigger Action），后者称为响应动作（Response Action）。当设计团队的一名成员发出触发动作时，如提出了一个新想法，就启动了一个新的会话，随着其他成员的响应，如表达各种意见等，该会话持续进行。

通过触发和响应动作，一个典型的会话过程由以下三个步骤构成：

① 步骤 1：触发动作。当一名设计人员产生了一个新想法或遇到一个问题时，他提出这一想法或问题，这就是触发动作。它会启动一个新的会话。

② 步骤 2：响应动作。当团队成员们有想法时，就作出一个响应动作，在会话中提出新的想法和问题。所有设计人员可以自由地提出与触发动作相关的新响应动作，或者响应该会话中已给出的响应动作。因此，触发动作和随后的各响应动作之间的关系就可以表示成树状结构，如图 5.8 所示。对设计人员来说，这非常难以管理，他们也很难从这种非连续的交流路径中找出自己的路线，但那种可以记录触发动作、响应动作，并能够以图形的方式呈现这段历史的支撑系统则可以帮助设计人员解决这一问题。

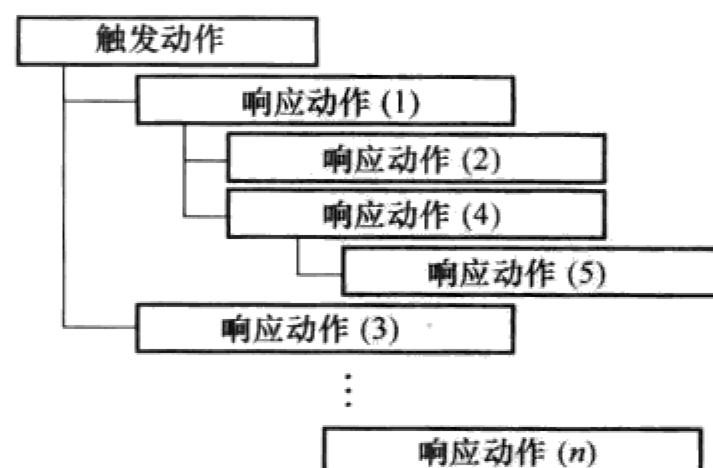


图 5.8　触发动作和随后的各响应动作联立而成的树状结构

③ 步骤3：检查是否还有更多新的响应动作。如果有任何新的响应动作，返回步骤2；如果没有新的响应动作，这个特定的会话就到此结束。

在一个会话期间，参与者可能会提出数个想法。然而，从链反应过程来看，一个新的想法并不总是与触发它的刺激有关，正如设计人员的某个灵感与当前刺激没任何关系。此外，会话中的主题可能会随着会话的进行而发生改变，因此，初始设定的主题在会话中可演变成另一个完全不同的主题。在这种情况下，最好把这样的想法或主题会话中分离出来，单独进行处理，这样做可以让设计人员更加容易地理解、沟通。此类操作称为会话分支（Session Fork）。

当人们尝试寻找新的创意时，很少能一蹴而就。相反，要创造性地尝试和解决问题，首先要考虑常规的思路和探索方向，随后再考虑一些细节问题，这样就有可能由此而萌生出一个可行的想法。从最初设定目标到取得创造性想法之间的概念发展就是所谓的方法（Approach）。在设计过程中，采用各种方法会使设计人员的思维过程变得更连贯，设计目标就变得更清晰、明确，也能更有效地激发出各种想法。

在设计活动中，设计人员的创意过程包括两个步骤：探索设计方法并逐步实现创意。但设计人员不必明确区分这些步骤，甚至在某些情况下，设计人员还会不自觉地把这两个步骤混合在一起。此处明确区分这两个步骤，为的是让相互合作的设计人员能分开处理这两个步骤。明确区分这些步骤的好处在于，可以增加从各种方法得到好想法的概率。

如果把设计方法和创意分开考虑，设计人员完成预定目标想法的过程就可以表示为一个三层结构：目标、方法和创意。可能有几种方法都能实现给定目标，也可能会有多个方法都能产生有用的创意。大多数设计过程的层次结构都包括一个目标、一个独立的方法和一个创意想法。但在许多情况下，该层次结构的下一层可能还存在更多的可选方案。某些情况下，某个创意可能是从多个并行的方法中得到的，某个方法也可能会实现多个设计目标。如果考虑这些情况，那么一个设计项目的整体层次结构就要表示成含有数目众多的目标、方法和创意的庞大而复杂的结构，该结构称为链结构（Link-Structure），如图 5.9 所示。

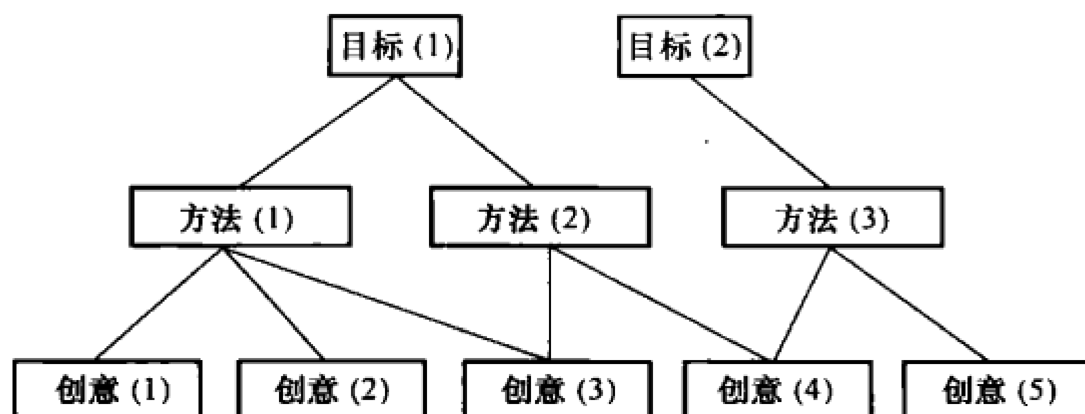


图 5.9　链结构的目标、方法和创意

会话为协同设计过程提供了一个产生创意的协同流程，但它并不代表设计人员产生创意时的探索方向。使用链结构能让设计人员把重点放在具体的想法上，从而最大限度地达到产品设计的最优化目标。设计人员在多个会话中相互合作来创造方法和创意，人们开发出了链结构，用以记录和整理这一创新过程，它能够跟踪、激发出更多的设计创意。链结构还可以明确区分出较好的设计创意，也就是最有可能产生成功产品设计的创意。

图 5.10 所示为一个设计过程的整体流程，它更像是一个概念性设计方案的创意流程。这个流程包括以下两个阶段：创意的产生和讨论设计方案。

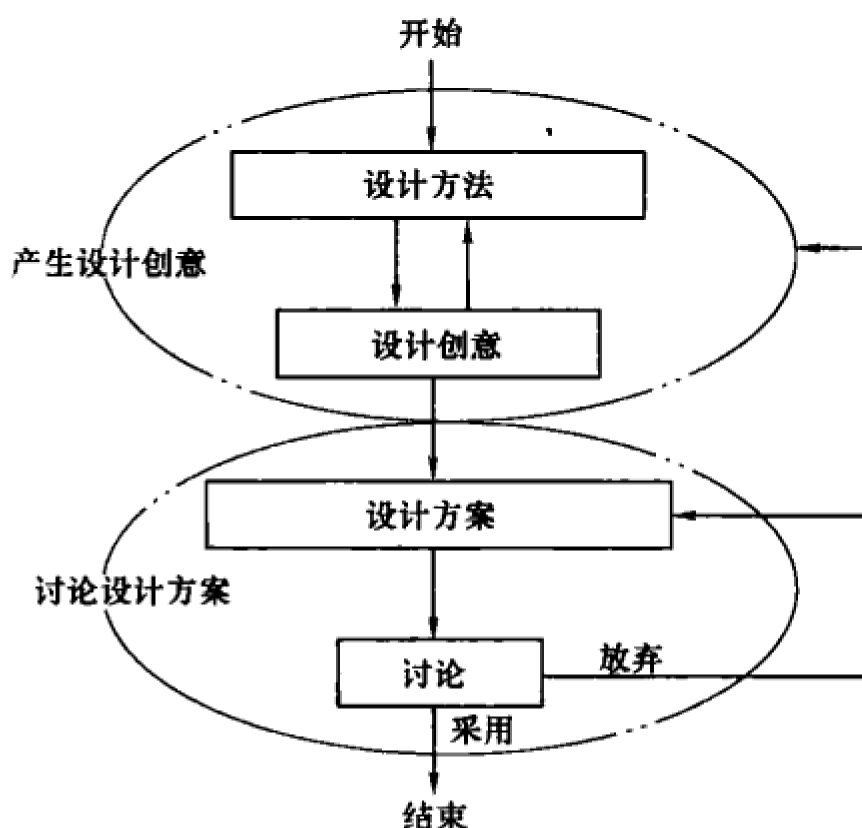


图 5.10　设计过程的整体流程

第一阶段：创意的产生。通过使用会话，让设计人员提出尽可能多的创意，并以链结构工具探索创意和方法的方向。值得注意的是，这个过程只考虑了创意的产生，没有考虑这些创意之间的关系。

第二阶段：讨论设计方案。设计人员选择并结合第一阶段链结构产生的创意，提出一个可行的设计方案。所有设计人员讨论和评价这个设计方案，并决定是否采纳它。如果设计方案得到采纳，设计过程完成；如果没有采用设计方案，设计人员分析设计方案存在的问题，要么返回第一阶段，要么为第二阶段的讨论提出新设计方案。第一和第二两个阶段都会使用会话。一旦某个设计人员提出新方案，把它作为触发动作，就会开启一个新会话。如果把所讨论的设计方案用作最终设计方案，或者当设计人员对所讨论设计方案存在的问题进行分析后决定放弃该方案时，结束会话。

5.1.4　数据库技术

如果产品制造数据由各个部门或环节分散管理，那么就无法实施并行工程和协同，并从中获益。图 5.11 所示为产品数据管理（Product Data Management，PDM）的概念示意图。这一方法集中管理与产品规划、开发、设计、制造、市场、维护等方面相关的产品和零部件数据。它主要包括的内容有：零件配置表、设计图样、设计规范、设计手册、零部件管理数据、材料订购数据、成本信息、零部件强度分析结果等。

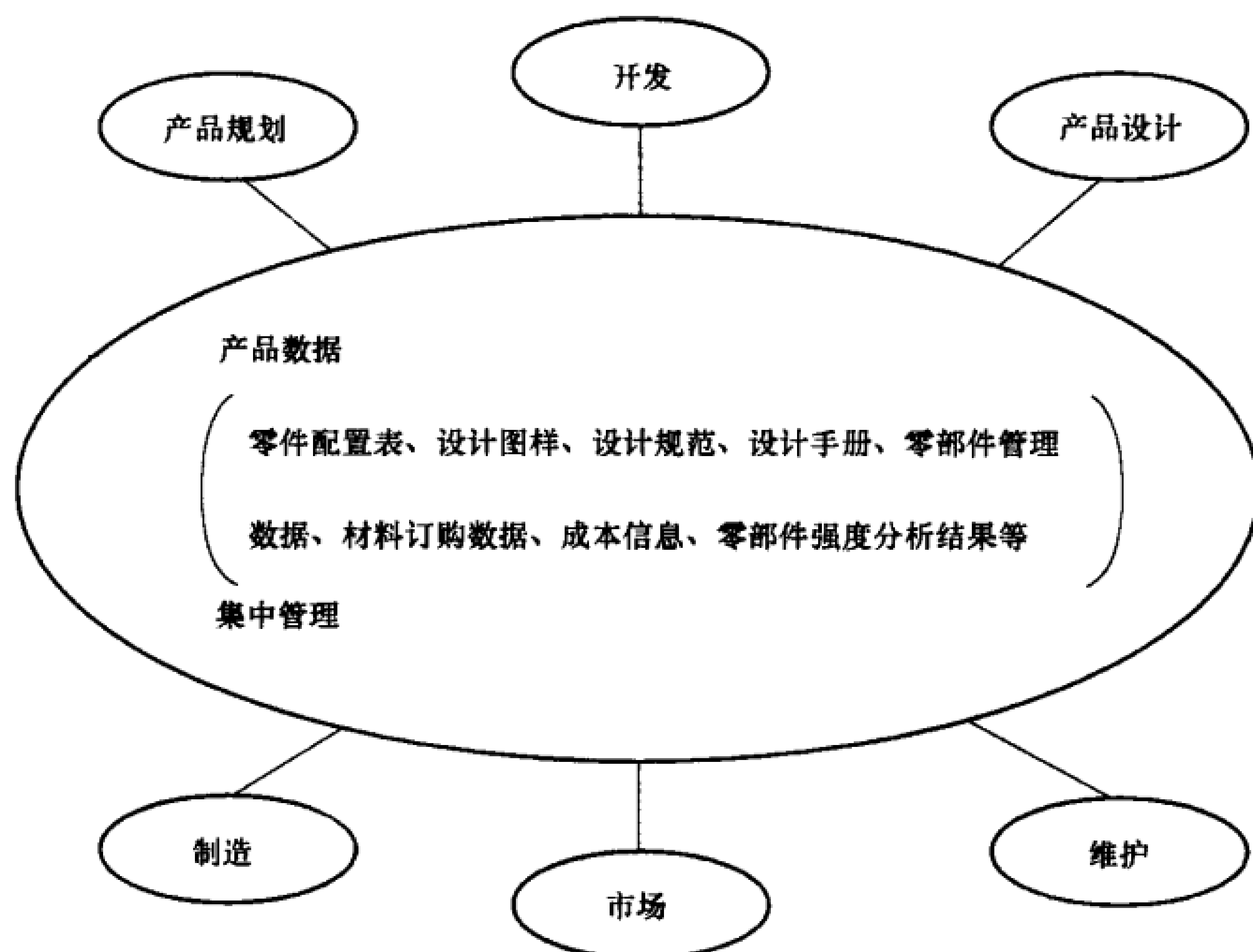


图 5.11　产品数据管理的概念示意图

TRIZ 是一个数据库系统，用于存储和访问以往产品制造信息和知识，它可以用来支撑产品开发过程，也可以用于新产品的开发[8]。TRIZ 是俄语单词首字母的缩写，它的意思是问题创新解决理论（Theory of Innovative Problem Solving）。1946 年在俄罗斯构建了这一方法，并将其应用于实际的产品开发。

TRIZ 理论的创始人 Genrich Altshuller 认为，人们在发明和解决问题时，都会遵循一定的规律。他调查了大约 400，000 项专利，收集了支持这一规律的数据，并开发出了可用于新发明的公式和规则。TRIZ 建立在一个概念之上——技术系统的进化遵循于各种各样的法则和规律。

在这一方法中，首先要描述问题，对问题进行建模，确定并检验所要解决的关键问题，然后用物—场分析建模方法（Material-Field Analysis Modeling Method）和解决核心问题的算法，从诸多理想解决方案中推导出切实可行的解决方案。从本质上讲，它基于对以往技术知识案例的总结提出解决问题的指导原则，然后结合当前技术提出问题的解决方案。通常来说，设计人员的知识和思想广度是有限的，TRIZ 的目的是要克服这一障碍。

5.1.5　制造支撑技术

1. 供应链管理的瓶颈

约束理论（Theory of Constraints，TOC）是一种广泛用于具体制造流程全局优化的技术方法，包括从原材料的采购直到市场销售等方方面面。它是供应链管理

(Supply Chain Management, SCM) 所要实现的目标。正如以色列物理学家高德拉特 (Goldratt) 在 TOC 方法中指出的那样，目标导向流程的瓶颈是优化问题中最主要的约束，也就是说，该约束会严重影响最优解决方案[9]。因此，当连续发现一个或多个瓶颈问题并予以解决后，制造过程就可能是最接近于全局优化的流程。

在 SCM 中，每个工艺过程或者活动都会被认为是依次相连的，就像一个链条中的各个环节一样。整个工艺过程的最大吞吐量会受限于某个进程或者环节的吞吐量，该进程或环节就是所谓的瓶颈 (Bottleneck)。换句话说，如果把单位时间内的产量作为衡量标准，具有最小产量的工艺过程就是瓶颈，它会限制整个制造过程的整体产量。因此，即使单独优化了每个过程的生产能力，也不一定能使个整个制造过程达到最优生产力，这就是 TOC 理论的基本要点。但在 TOC 中，系统局部的探索式优化是迭代进行的，从理论上讲是无法获得全局最优解的。

2. 纳入质量工程的设计

如果已确定了零部件的详细设计方案，产品制造技术中最重要的课题就是在不影响质量的前提下找到降低制造成本的方法。在设计中纳入质量工程 (Quality Engineering)，同时考虑零部件尺寸精度、表面质量和制造成本等问题，在确保零部件质量的同时将制造成本降到最低。

那些影响产品质量和功能的有害因素称为质量损失因素 (Quality Loss Factor)，包括环境条件、腐蚀、材料的各向异性、制造工艺的差异等。田口法 (Taguchi Method) 用损失函数表示因差异造成的损失量，客户通常对这些损失量都比较敏感[10]：

$$\text{产品性能差异造成的损失} = \text{常数} \times (\text{特征值 } y - \text{目标值 } m)^2$$

式中，特征值和目标值之差的平方表示损失。此处的损失类似于第 2.2 节中的不满意度。

在常规的产品制造中，要确定设计变量（参数），以便确定要实现的功能、性能和质量值。在制造过程完成后，还要评估这些因子的分散度，也就是实际生产出的产品与设计目标的差异程度。通常，提高机器的加工精度、使用质量较好的材料可以减小分散误差，但会显著提升制造成本。当同时考虑制造成本和产品特性之间的关系时，每个产品特征的参数设置或要求条件的不同会对分散度产生不同的影响。

在田口法中，如果多个参数的组合可以实现目标函数的设计值，或实现产品的性能值，那么要首先会搜索能够产生最小分散误差的参数组合，然后再调整称为调整因子 (Adjustment Factor) 的特殊参数，其目的是尽可能地使产品性能或函数值接近目标值。调整值对产品特征的分散度影响不大，但会极大地影响那些调整产品特征，使其达到目标值时所用到的特征值。

田口法用 SN 比[⊖]评估产品特征或函数的差异，它是一种估计函数鲁棒性

⊖ Signal-to-Noise Ratio, SN 比。——译者注

（Robustness）的方法，换言之，也就是评估稳定水平的方法。SN 比类似于通信工程中的信噪比，可通过以下关系求得：

$$\text{SN 比} = \frac{\text{函数的有效度}}{\text{函数的出错度}} = \frac{\beta^2}{\alpha^2} \tag{5.1}$$

式中，β 表示敏感度，α 表示测量出错的标准偏差。用 α 和 β 的平方计算 SN 比，是因为损失跟偏差的平方成正比。

上述用于减少特征偏差的设计方法称为参数设计法（Parameter Design Method）。该方法首先对由多个零部件构成的产品进行鲁棒性设计，然后搜索能够降低制造成本的方案。参数设计法的目标不是为了获得最优设计方案，而是减少特性变化。因此，通过这种方法获得的设计解决方案并不是最优方案。

通常，把评估特性变化的设计称为鲁棒设计（Robust Design），为了实现这一目标，需要使用以下两类方法：

① 即使特性发生了变化，设计方法要确保满足设计条件。

② 设计方法的目的为了减少设计方案对特征变化的敏感度。

田口法属于上述第二种方法。如果获得某个特定级别的性能特征较为重要，需要采用第一种方法，鲁棒设计优化法要在优化流程的基础上使用[11~13]。至于如何分析设计变量或参数引起产品性能、质量和功能的变化，存在以下两种情况：

① 如果为变量或参数定义的公差为 $\pm 3\sigma$，使用概率分析（Probability Analysis）。

② 如果定义距离均值的最大偏差为 $\pm\Delta$，也就是说定义了最大允许偏差，使用最差情景分析（Worst Case Analysis）。

对于上述第一种情况，设计变量的偏差会纳入产品优化设计的概率表达式中；而对于第二种情况，考虑 3σ 绝对值所引起的变化，把目标函数和约束函数的容差范围设置成最差情景。

如果把存在偏差的变量表示成 d_j（$j=1, 2, \cdots, n$），约束函数 g_i 和目标函数 f 的相应变化可用泰勒级数的一阶估计近似求解。例如 d_j 的标准偏差 σ_{d_j} 的约束函数是 g_i，g_i 的标准偏差 σ_{g_i} 可用计算为

$$\sigma_{g_i}^2 = \sum_{j=l}^{n} \left| \frac{\partial g_i}{\partial d_j} \partial_{d_j} \right| \tag{5.2}$$

对于上述第二种情况，如果变量 d_j 的最差偏差值的变化为 Δd_j，传递给约束函数 g_i 的值 Δg_i 可通过以下线性估计得到：

$$\Delta g_i = \sum_{j=l}^{n} \left| \frac{\partial g_i}{\partial d_j} \Delta d_j \right| \tag{5.3}$$

对于上述第一种情况，优化问题的约束可转换成以下形式：

$$g_i + k\sigma_{g_i} \leqslant 0 \tag{5.4}$$

式中，当公差为 $\pm 3\sigma$ 时，k 值是3。

但在第二种情况下，优化问题的约束为

$$g_i + \Delta g_i \leqslant 0$$

图5.12所示为带偏差的设计变量 d_1 和 d_2 的设计变量空间（Design Variable Space）。如果不考虑偏差，约束函数 g_1 和 g_2 如图5.12所示；但如果考虑偏差，这些直线会移动到 g_1' 和 g_2'。可信区域会变得更小，通过目标函数轮廓线的交集得出的优化设计解会从 A 移动到 A'。

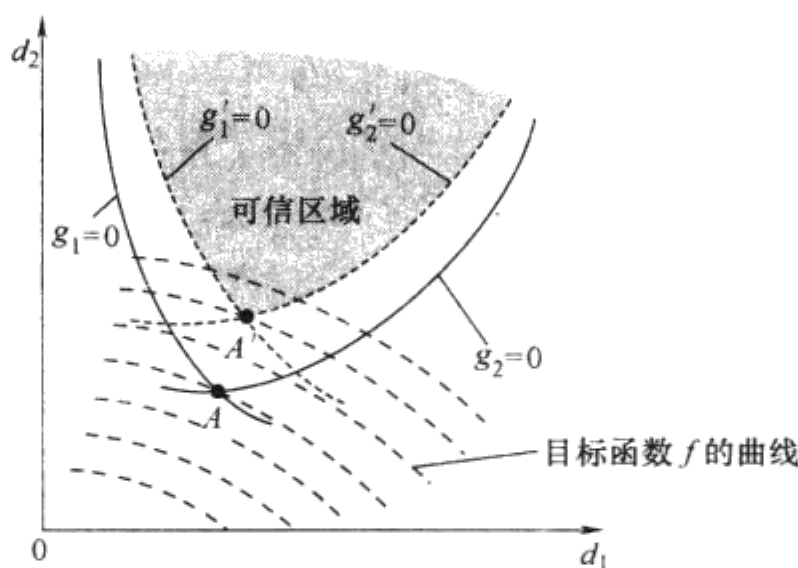


图5.12 带偏差的设计变量 d_1 和 d_2 的设计变量空间

在上述第二种情况下进行优化时，应尽可能最小化偏差的传递，并把公式（5.2）或公式（5.3）包含在优化目标函数中。

3. 装配难度估计

绝大多数产品都由多个零部件组成，装配时间和相应的经济成本通常在产品制造成本中占据相当可观的比例。装配时间取决于产品的设计。为特定产品设计定量评估装配难度，可以有效地降低装配成本，Boothroyd 提出了一种解决此问题的方法[14,15]。图5.13所示为装配期间的零件插入模式，它显示了零件形状对装配难度的影响。这些实体形状必须由工业机器人将其插入到相应的孔中。α 是零件绕垂直于插入方向轴的最大转角，β 是零件绕插入方向的最大转角。随着 α 和 β 的增大，插入零件所需的时间也随之增加，这也提升了装配的难度。

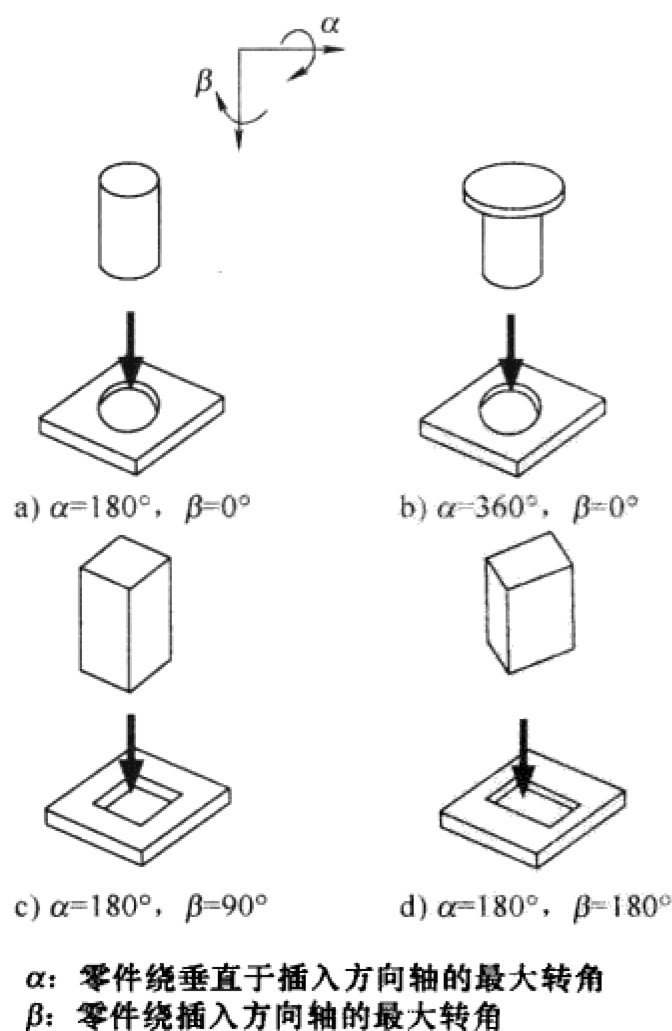


图5.13 装配期间的零件插入模式

在产品使用过程中，对零件进行维修和更换的困难程度，以及在产品停止使用后对零件和材料的再使用和回收难度都取决于产品的拆卸难易度。如第3.3节所述，出于对环境问题的关注，在并行设计产品

的早期阶段就要考虑这些问题，它们也变得越来越重要。

4. 成组技术

当制造模式发展到车间任务型生产，再发展到订单生产，制造多样化的产品变得越来越重要。产品的多样化往往会增加制造成本。在实现多样化生产的同时如何成功降低成本，已成为产品制造领域中最重要的一个问题。

如果产品包含的零部件非常少，设计和制造策略能极大地丰富产品种类，此时，产品制造成本的降低程度就取决于所采取的设计和制造策略。为了有效地实现这一目标，通常会在产品设计阶段采用成组技术（Group Technology，GT），虽然 GT 通常用于制造阶段。

1958 年，Mitrofanov 第一次提出了 GT 的概念，为了便于制造加工，他对产品零件作了分组[16]。零件的分组是通过对零件的设计和制造属性进行编码完成的。目前已开发出了许多种零件分类方法和编码系统，大多使用数字来进行编码。图 5.14 所示为 GT 概念的示意图，它给出的是一个简化的零件形状和对应的编码。第 1 组数字表示零件的基本外形；第 2 组数字表示内部零件的形状、尺寸和主要加工工艺；第 3 组数字是额外形状数据的编码，如孔、螺纹、沟槽和其他要加工的形状要素。

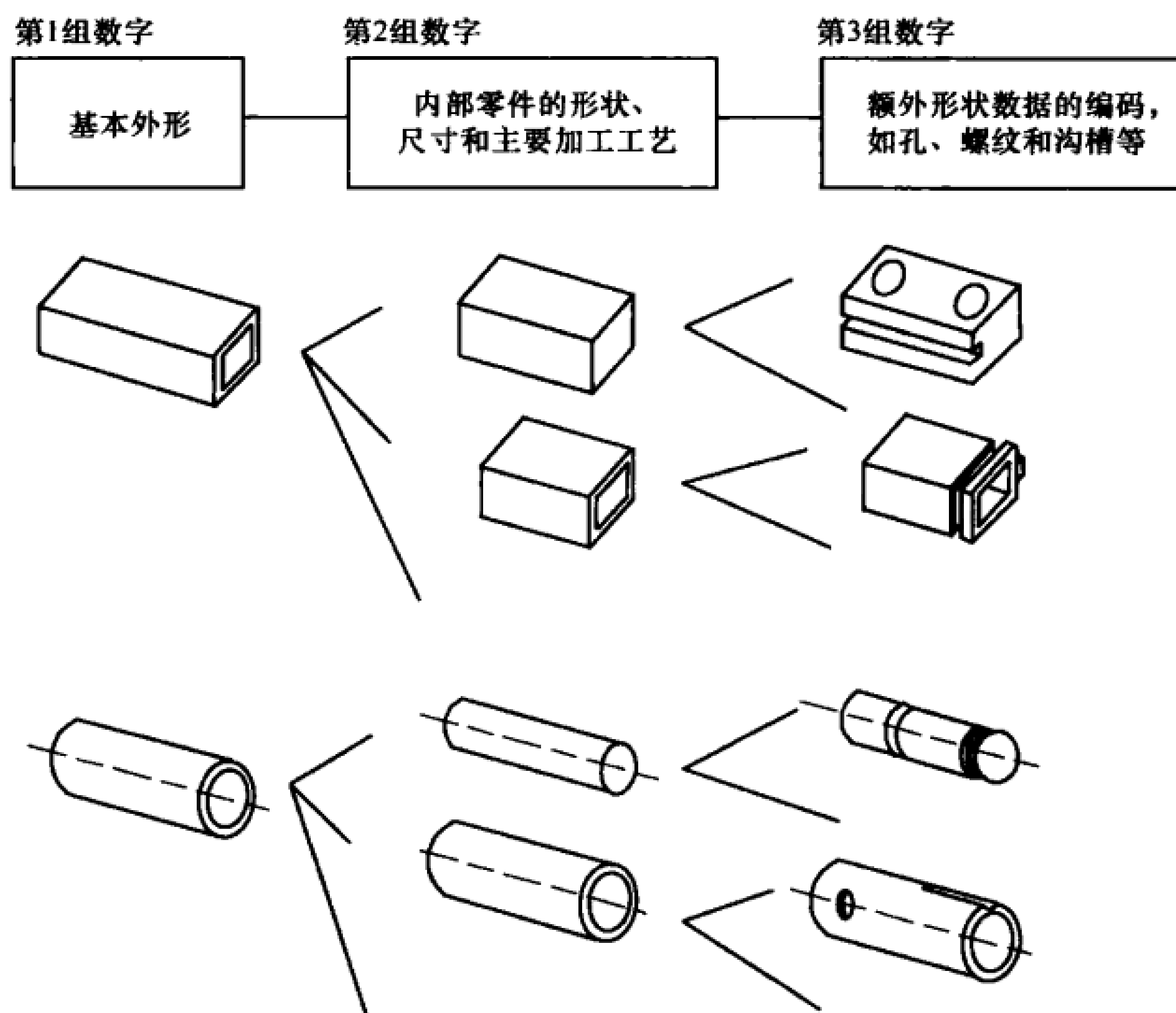


图 5.14　GT 概念的示意图

GT 对零件进行分类，并根据它们的形状、尺寸和制造加工工艺的相似性进行分组，从而提高生产力，降低产品的制造成本。目前，GT 已应用于现有的产品设计来提高生产效率，但必须基于并行工程的概念，从产品设计阶段就开始应用，才能发挥它的最大功效[17]。

从产品设计阶段就运用 GT，会为产品制造的相关过程中带来以下好处：

① 可以减少产品设计中重新设计的零部件数量，使自动设计流程和数控加工程序的创建更加容易。

② 在生产过程规划和管理中，流程规划和日程安排变得更加容易。

③ 在生产过程中，制造模式可以从车间任务型生产（每项任务的工作内容和工艺都不同）转变为大批量或大规模生产模式。由于对不同的工作进行了分组，并将其应用于相同的零部件组，用相同的夹具和工具进行加工，减少了零件装夹时间，因此可以有效地降低生产成本。

在制造新产品或同系列产品时，尽可能多地使用相同或近乎相同的零部件，这样可以降低制造成本。然而当通过零件分组降低制造成本时，产品的性能和质量可能会受到影响，如图 5.15 所示。如果发生这种情况，就应同时评估零件分组所带来的正面和负面后果之间的矛盾关系。如果在产品设计阶段没有考虑制造成本，零件的设计变量将出现不同的值。换句话说，如果只把产品的性能作为目标函数，能使目标函数达到最小值（这种情况下，该值越小越好）的设计就是最优解。产品的所有零部件都有不同的设计变量值。在这种情况下，制造成本可能会非常得高。在图 5.15 中，P_1 和 P_2 间的区域就是制造成本最低、产品性能最好的情况。在 P_3 和 P_4 之间的区域，通过零件分组来降低制造成本的效果并不明显，而产品的性能则降低到了不可接受的程度。要充分利用 GT，就要对产品性能目标函数值的增量进行评估，该值来自于所有零部件拥有不同设计变量值的目标函数的最小值。最优设计方案就是诸多设计方案中具有最小制造成本的那个，其中，目标函数的增量值小于最优设计方案所允许的值。

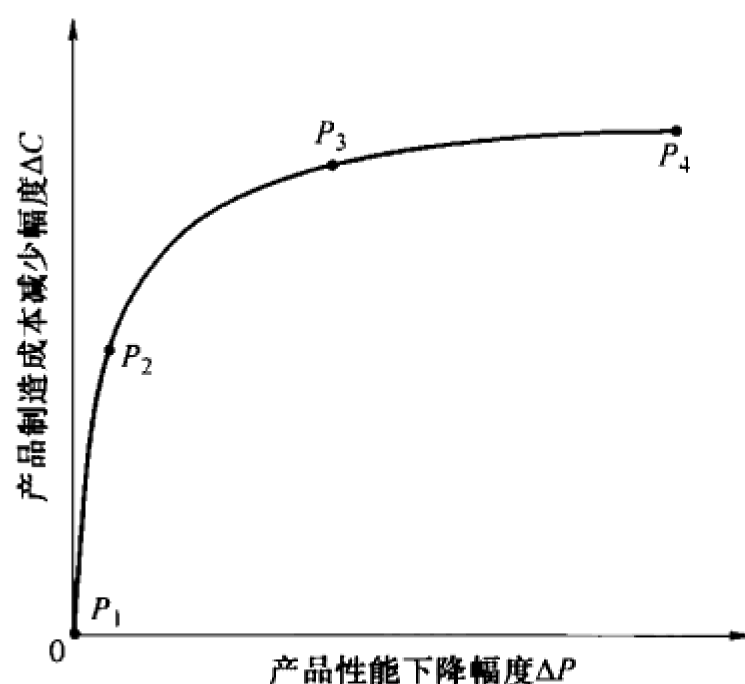


图 5.15 零件分组引起的制造成本降低和产品性能下降之间的关系

5. 过程规划

过程规划的目的是从现有可用的制造方法和程序中选择出最佳的制造方法和程序[18,19]。优化的一般标准就是在满足零件特性要求（如精度）的条件下，最

大限度地降低制造成本。下面解释产品设计优化中的过程规划的重要性和意义。

(1) 零件精度和制造成本的关系

相连接零件的接触表面精度是非常重要的因素。接触面的加工精度和加工成本的关系如图5.16所示。由图可见，两者呈二次函数关系。加工精度越高，加工成本就越高。

(2) 加工精度和产品性能的关系

图5.17所示为零件的加工精度和（以这个零件作为部件的）产品性能的关系。

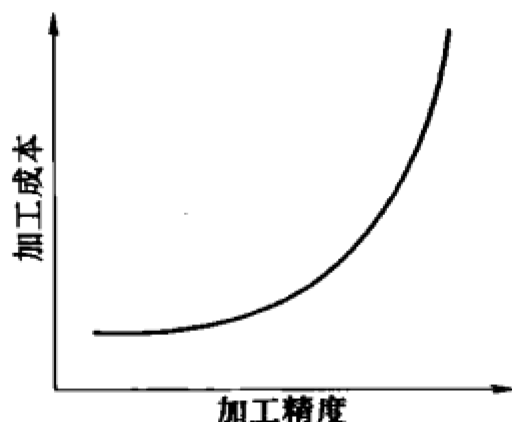


图5.16　接触面的加工精度和加工成本的关系

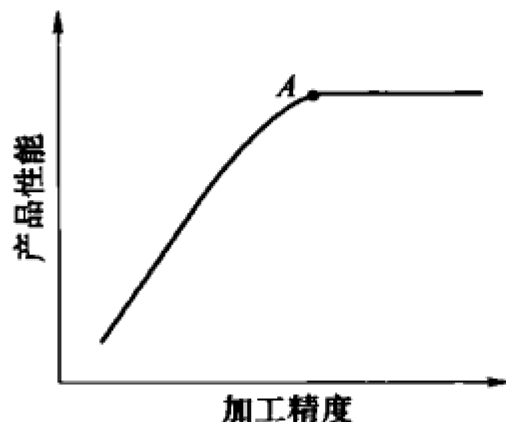


图5.17　零件的加工精度和（以这个零件作为部件的）产品性能的关系

通常情况下，在制造机械零件时，更高的加工精度将带来更高的产品性能；但如图5.17所示，在某个点之后（A点），额外增加的加工精度（会额外增加生产成本）并不能提升产品性能。为了制订产品的最佳制造参数，只能选择对产品性能和生产成本进行优化后所得帕累托最优解曲线上的设计方案，如图2.11所示。从图5.16和5.17可以看出，对于零件不必要的高加工精度除了徒增加工成本外，无法带来实际的益处。在这种情况下，解决方案会落在如图2.11所示的可信区域内，而不是位于帕累托最优解曲线上。

(3) 零件制造的备选方案

当把机械零件制造成所需的形状和精度时，可能还会有一些备选的设计和制造方案。以下是机械零件制造中的典型加工方法：

① 机械加工中。

② 锻造。

③ 铸造。

④ 焊接。

到底应该选择哪一种备选方案，取决于下面将要阐述的内容（然而，通常可根据经验来作出选择：当被加工的零件形状比较复杂时，有许多加工方案可去除材料，并精加工表面。在对材料进行锻造、铸造或者焊接之前，可能还要经过

一些车铣加工，如铣削、研磨、抛光等。如果需要最高精度的加工，最后可能会用到抛光；如果要求精度不是非常高，简单的铣削就可以达到要求。

（4）确定最佳零件制造方案

图 5.18 所示为机械零件的精度和达到精度要求的最低制造成本之间的关系。图中的曲线是多目标优化问题的帕累托最优解曲线，最大化加工精度，最小化制造成本。

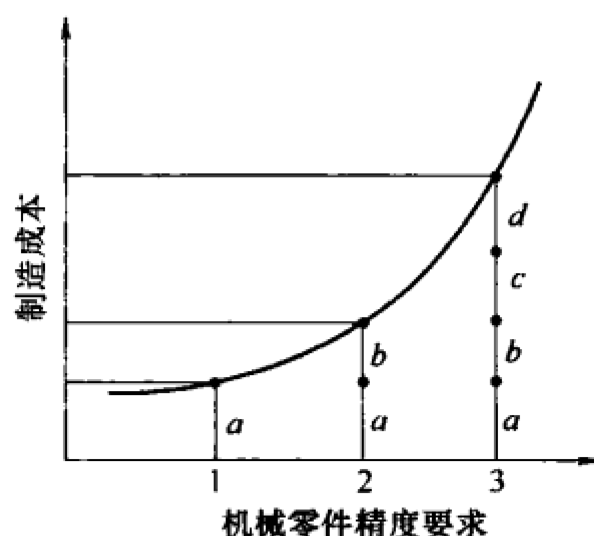


图 5.18 机械零件的精度和达到精度要求的最低制造成本之间的关系

在图 5.18 中，加工方法 a 和 b 可以实现点 2 处所需的加工精度。每种加工方法所需的制造成本在纵轴上显示，把这些成本之和标注在帕累托最优解曲线上。在这个例子中，“a”对应铣削，“b”对应研磨，“c”对应超精加工，“d”对应费力的手工研磨。

一般情况下，零件需要经过多个制造过程才能达到所要求的精度，加工精度的提高会导致加工过程单位面积成本的急剧增加。过程规划的目的是获得并保持图 5.18 所示的帕累托最优制造过程解。

（5）从大量备选制造方案中进行选择的相关因素

以下因素会影响最佳制造方案的选择：

① 所要制造零件的数量。

② 零件的材料。

③ 零件的尺寸和形状。

一方面，如果要加工大量的零件，有可能初始安装成本会比较高，但还是可以使用锻造、压铸、压模等技术，因为从预期销量的角度来看，总成本还是有保障的；另一方面，如果要加工一个或少量零件，机械加工和焊接往往由于其相对较低的成本而被选用。至于零件材料，如果必须尽量降低零件重量，才考虑使用铝或其他高性能的金属合金。同样，如果高强度是主要目标，就需要通过锻造而不是铸造来加工零件。小零件可以用机械加工，大型复杂曲面零件可以铸造，大型但结构简单的零件可以焊接，需要高硬度的零件可以采用粉末冶金技术制造。要选出最合适的制造过程或工艺，必须仔细考虑所有的影响因素，包括时间限制和工厂的生产能力等。

（6）获取最优解的方法

要获得理想的过程规划结果，有两种基本方法：生成法（Generative Approach）和变形法（Variant Approach）[19]。生成法是一种理想方法，它使用人工智能等技术自动生成制造方法和制造工序。适用于复杂机器零件的生成法目前

还比较困难，但在未来可能会实现。

变形法的实施基础是通过以往经验建立的技术知识数据库，它要用到前一节阐述的 GT 编码方法。变形法一般会产生多种备选方案和优化技术，然后用这些方案和技术获取最佳方案和详细的过程规划解决方案。

6. 模块技术

模块技术（Module Technology）是另一项重要技术，它的目标是在降低产品设计、制造成本和开发时间的同时，满足各种顾客的需求和要求[20,21]。如果必须制造多种产品，制造成本往往会大大增加。模块技术通过提高产品的设计理念和效率、改进制造方法和机器装备来降低制造成本。也就是说，增加产品的多样性或使制造成本增加。要重点关注这一冲突关系，并尽可能地解决这一问题。模块技术的概念类似于与成组技术（GT）。

要从模块技术受益，必须满足以下两个要求：

① 产品零部件的通用性。

② 用来生产零件和产品的工艺、设备的通用性。

上述第①条要求要尽可能地把同一零件用于不同的产品；第②条则要求尽可能在同一工厂，用相同的设备生产不同的产品和零件。

在上述第①条要求中，公用零件会用于不同的产品。零件或单元要设计成可用于各种不同产品的模块（Module）或模块零件（Modular Part）。大型模块、具有高度公用性的模块、由多个公用零件装配成的更大模块都称为平台（Platform）。图 5.19 所示为单一平台上的模块化设计，其中的公用零件会用在不同的产品中。用户可直接评价的产品零件，例如汽车的外部或者内部形态，视个人喜好的不同而不同。因此，模块技术的目的在于协调产品多样化和降低制造成本两者之间的关系。

在上述第②条要求中，单一的生产厂家必须既可生产零部件产品，又从事产品的装配。例如当设计一个制造工厂时，把制造产品的模块化设备安装在某个平台上，这样可以生产某个特定但在一定范围内充满变化的产品或零件。当生产不同产品或零部件时，相应地改变平台上的模块化设备就可以了。

模块化设计的重点是要制订灵活的决策，以便让模块化零件和装备可用于系列产品或设备。虽然图 5.15 是 GT 的概念图，但该图给出了采用模块化设计降低制造成本和可能降低的产品性能之间的概念关系。在设计一系列相互关联的产品时，必须要仔细考虑这些关系。

7. 调度技术

制造机械产品时，通常需要多个工艺流程。减少每个工艺过程所需的时间非常重要，其目的是缩短产品的交货时间，并降低生产成本。

对车间任务型生产模式的规划较复杂，因为它依赖于可用的公用零件、所需

零件和材料的数量、采购和处理这些零件或材料所需的时间、综合库存管理等因素。如果无法完整地执行这样的管理和生产工艺，整个制造过程可能会遇到库存过剩、供应延误和缺乏必要零部件、共用零件订单重复和库存混乱等问题。为了防止出现这些问题，生产管理信息和生产技术信息必须持续可用，并要及时、精确地得到所需物资的详细信息和数量。仅仅依靠经验和直觉开展如此复杂的活动几乎是不可能的。

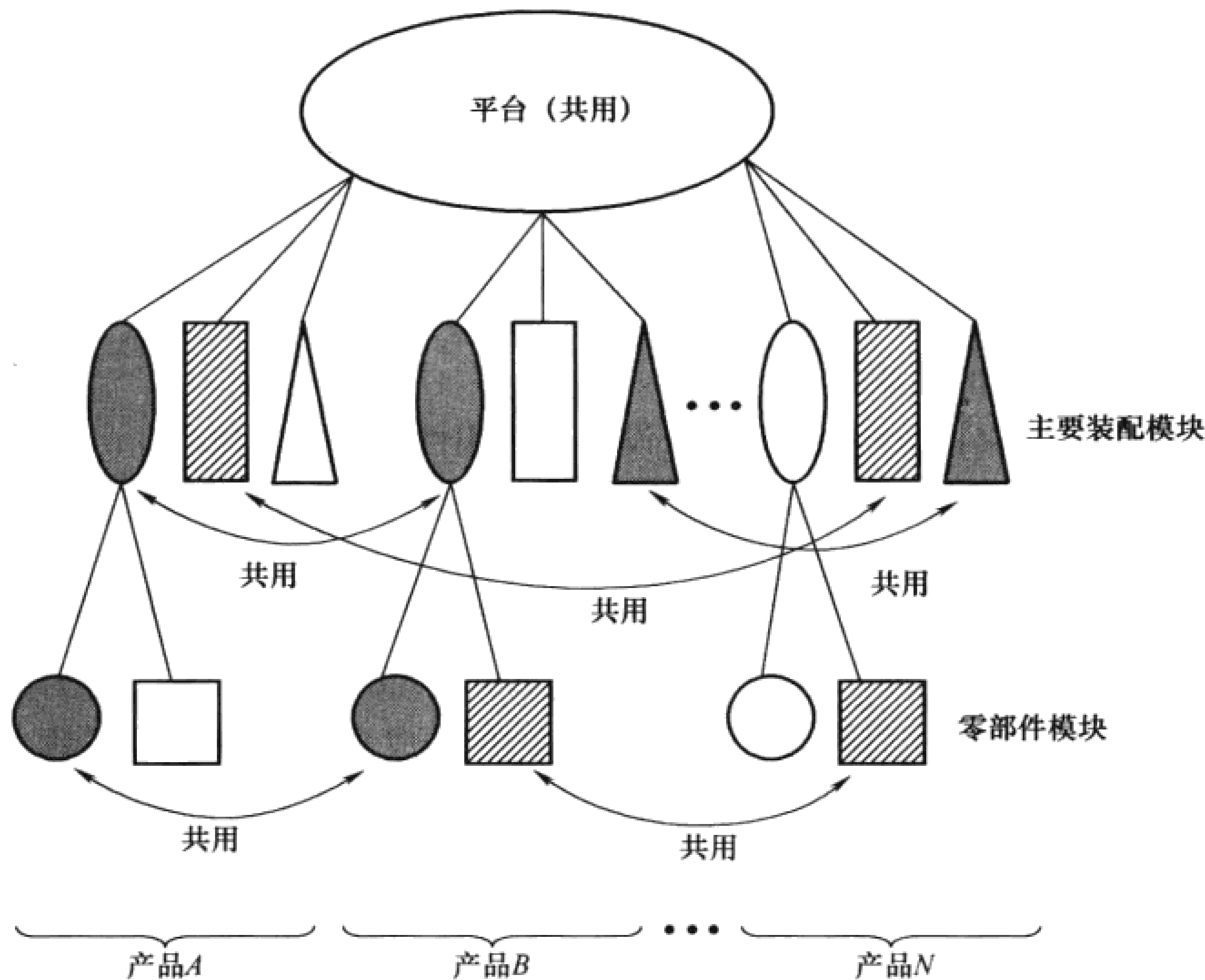


图 5.19 单一平台上的模块化设计

物料需求规划（Material Requirements Planning，MRP）使用计算机系统来监督作业操作[22]。物料需求规划完成后，要确定生产调度，以便减少生产时间。图 5.20 所示为 MRP 和调度。从客户订单开始，然后规划如何满足物料需求、实施生产调度、开始制造，并最终向客户递交产品。

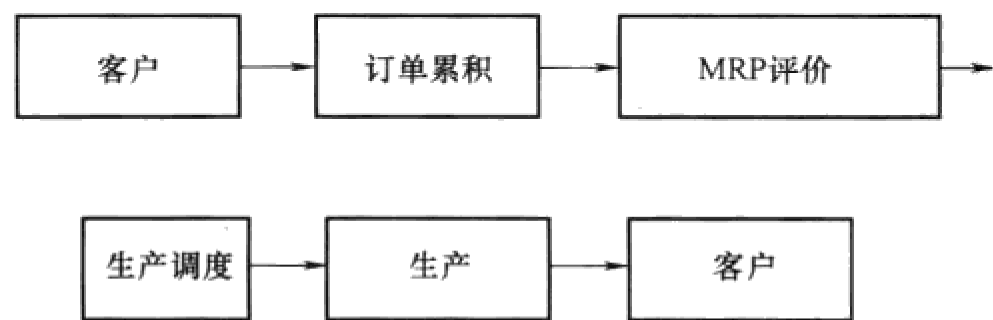


图 5.20 MRP 和调度

下面以图 2.4 中的柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell，FMC）为例，说明如何制订生产调度。其优化目标是最小化所有零件的机械加工总时间（完工时间），图中用来传送零件的工业机器人周围布置了各种机床[23,24]。工业机器人用一条传送带传送零件，并把它们加载到柔性制造单元的机械工具中。它根据需要持续地把零件从某个机床传递到相邻缓冲区，或从缓冲区传递到下一个相邻的机床，最后把零件从加工单元传递给传送带，把完成的零件传递给客户。从第一个零件放在传送装置上到最后一个零件离开传送装置所需的总时间即完工时间。拥有最短完工时间的零件传递顺序就是最优解。

用于四零件、三机床和工业机器人流水作业调度问题的数据如表 5.1 所示。工业机器人不仅执行传送任务，而且还要执行一些诸如测量的其他操作，以便在安装时可以把零件放到机床适当的位置上。这些额外操作所需的时间延长了零件的传送时间。此处用到了流水作业（Flow-Shop）型制造系统，它用相同的工序加工所有零件。

表 5.1　用于四零件、三机床和工业机器人流水作业调度问题的数据

零件序号	车床加工时间/S			机器人的传输时间/S					
	M_1	M_2	M_3	$B_1 \to M_1$	$M_1 \to B_2$	$B_2 \to M_2$	$M_2 \to B_3$	$B_3 \to M_3$	$M_3 \to B_4$
1	50	55	30	60	10	50	10	20	10
2	40	60	55	30	10	20	10	40	10
3	65	40	60	45	10	35	10	70	10
4	30	70	30	20	10	45	10	20	10

所求问题为离散设计变量的优化问题时，用分支界限法（参见第 6.1 节）可以求得最优零件传送序列。图 5.21 所示为最优解决方案的甘特图，也就是操作顺序的时间管理图。所得的总加工时间是 685s，最优零件传输次数是 24 [即 4（零件数）×3（机床数）×2（传送类型数）= 24]。大约在 1903 年，Henry Laurence Gantt 创建了甘特图，它是一种可视化表示此类工作流程的方法。这种图表通用来在生产工人间共享信息。

一般情况下，调度问题主要由工艺设计人员解决[25-27]，他们关注于如何获得表 5.1 所示各类问题的最佳解决方案。然而，如果改变零件或产品的设计，表 5.1 中的数据可能会从根本上发生改变，即使是将某个特定流程的工艺时间已经减少到最小，整个生产流程还是可能会存在不必要的延迟，就像某些特定零件在下一道工序开始之前需要等待一样。在这种情况下，如果同时考虑其他相关工艺，可能会得到更合适的解决方案。因此，并行工程概念对于这些问题也是至关重要的。

另一种表示流程规划的方法是 PERT [Program (Project) Evaluation and

Review Technique，计划（项目）评审技术]，它用箭头表示项目的所有工作流程，并给出每项操作和工序所需的时间。

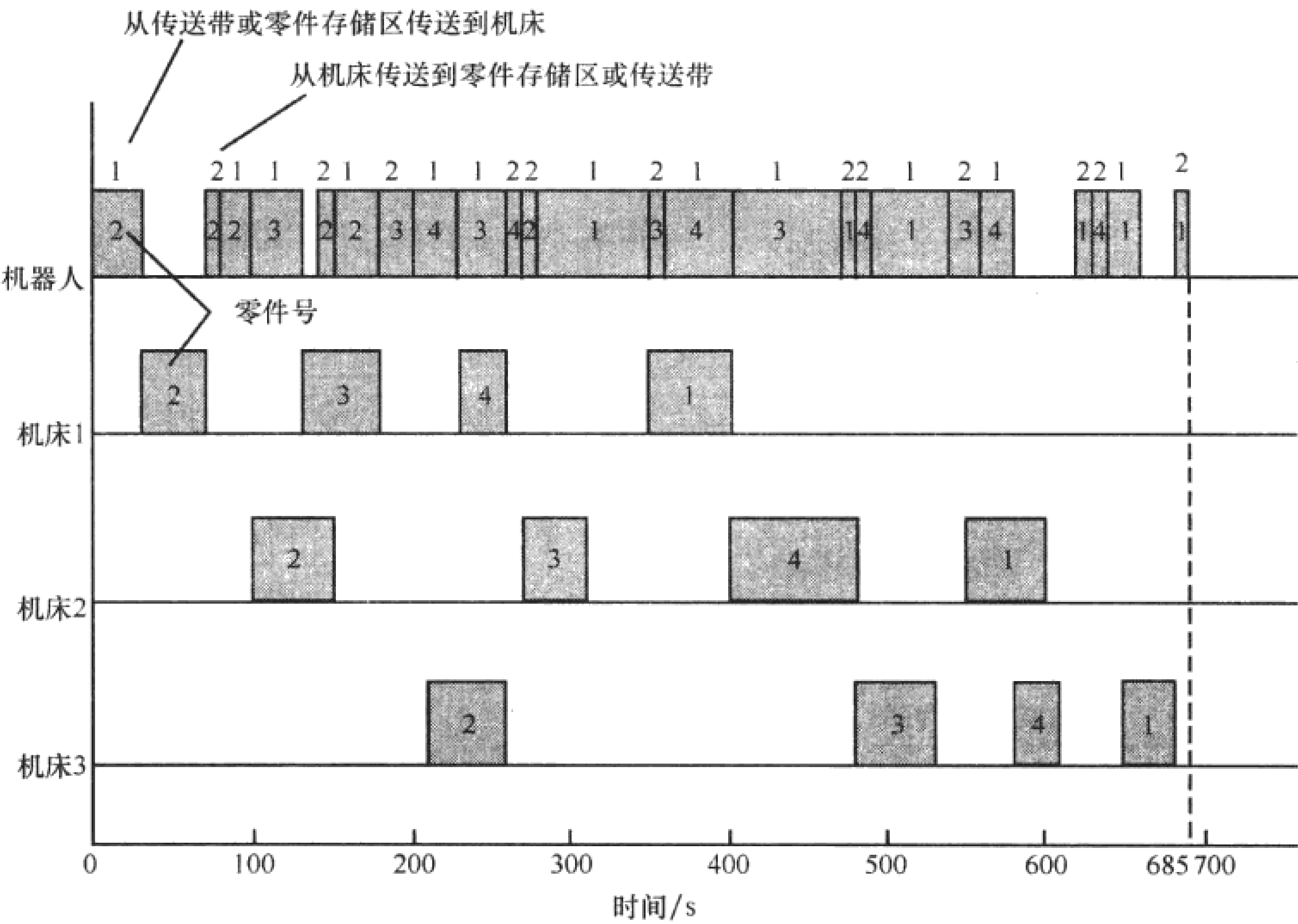


图 5.21 最优解决方案的甘特图

5.1.6 客户需求信息获取技术

1. 客户需求信息的收集和客户分类

通常情况下，产品设计优化的首要任务是最大限度地提高潜在客户的满意度。满意度一般是通过对许多产品属性的综合评价来获得的，但另一种方法是基于这些客户对产品的需求来评价产品设计。客户的需求通常是多样的，因此需要对客户进行分组，为所有特定客户群设计出最合适的产品。

图 5.22 所示为基于市场调查的最大化客户满意度的设计流程。首先通过问卷方式收集顾客需求信息；然后将客户对产品属性的喜好范围聚类分析，并以此为基础对客户进行分类，选择某个特定客户群作为产品制造的优化目标；最后用优化方法确定出能够最大限度提高目标客户群满意度的详细设计和制造方案。

例如在制造企业购买工业机械时，需要说明如何收集需求数据，并进行分析[28]。此处，以下两项评价可用来了解目标市场的需求：

① 估计对客户作出购买决策最重要的产品属性。

② 估计客户将会购买多少产品，以什么样的价格购买，并评估客户在①中所选择产品属性的重要程度。

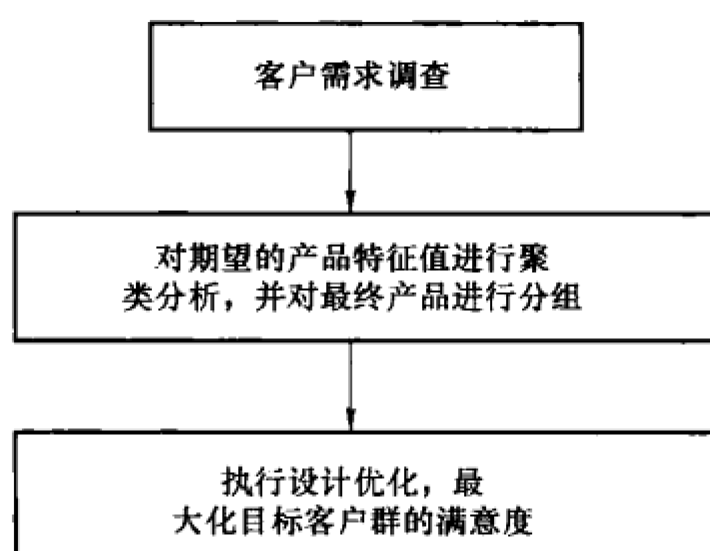


图 5.22　基于市场调查的最大化客户满意度的设计流程

利用收集到的数据，使用聚类分析法对潜在用户进行分类，用户需求的相似度通过度量产品属性的期望值得到。当有 n 个产品属性时，需要确定对顾客购买决策有最大影响的因素。对于具有 i（$i=1, 2, \cdots, n$）个属性的产品来说，第 j 个用户的期望值 $z_{i,j}$ 与第 $j+1$ 个用户的期望值 $z_{i,j+1}$ 之间的距离 $d_{j,j+1}$ 的定义如下：

$$d_{j,j+l}^2 = \sum_{i=l}^{n_a} a_j\{(z_{i,j}^* - z_{i,j+l}^*)/z_i^S\}^2 \tag{5.5}$$

式中，z_i^S 是产品属性 i 的标准值，引入该值的目的是可以用同样的尺度评价具有不同单位的产品属性；a_i 是产品属性 i 的加权系数，对于越重要的产品属性，其值会越大。在进行聚类分析后，可以有针对性地对特定产品进行开发，因为如果市场上有同类产品，产品的满意度就会明显降低。

2. 产品设计中获取客户需求的技术

对于设计优化来说，最重要的评价因素是产品潜在客户的满意度。最具代表性的在产品设计中考虑客户需求的流程是质量功能展开（Quality Function Deployment，QFD），它明确定义了产品设计和开发中顾客的需求和技术因素。QFD 的重要策略点在于，它同时对顾客需求和技术因素进行评价。

普利司通（Bridgestone）的在久留米（Kurume）的工厂提出了质量保证详细清单（Quality Guarantee Itemized List），三菱重工（Mitsubishi Heavy Industry）神户造船厂提出了质量清单（Quality List），QFD 是在以上两者的基础上提出的。1972 年，Yoji Akao 把 QFD 作为一种质量开发系统提出[29]。在后续几年中，人们进一步开发多个程序，使 QFD 变得更加成熟，并被引入多个行业领域[30]。现在，QFD 已得到了广泛的使用，特别是在欧洲和美洲。

图 5.23 所示为个人电脑产品 QFD 矩阵表的一部分。纵轴上列出的是潜在客户对产品质量的要求，横轴则列出了由产品制造商评估得出的各产品项的功能质量特征。图中用符号◎、○和△直观地表示出了客户要求和特征项之间的关系，◎表示非常强烈的关系，○表示中等强度关系，而△则表示弱关系。

QFD 用来确保产品质量、提升客户满意度，它通过分析客户需求与产品

特征间的关系来实现这一目标。用于机械产品的开发时，QFD 通过考虑产品质量要求、质量因素、功能、原理以及最终的零部件等因素，实施步进式的开发。每个阶段都以矩阵的形式制订出各种技术要素和产品的不同特性，如产品质量要求和质量要素矩阵、质量因素和功能矩阵。这些矩阵表能让企业的不同部门更容易地理解和评价产品所蕴含的知识和信息。因此，QFD 不仅在产品开发的综合决策中有效，而且在不同决策者协同制订决策方面也同样有效。

图 5.24 所示为一个考虑 QFD 层次结构的设计方法概念图。

			功能质量特征							产品质量要求的重要程度	加权系数
			速度					可操作性			
			主板	MPU	内存量	视频卡	HDD	键盘	鼠标		
对产品质量的要求	快速响应	快速绘图		◎	○	◎				4	5.2
		快速启动	△	◎	○		◎			5	8.0
		快速处理	△	◎	○					3	4.4
	操作容易	字母数字容易输入						◎		2	3.2
		绘图简单							◎	2	2.6
		人机工程学						○	△	3	2.8
质量因素的重要性程度			3.2	8.4	6.6	4.2	4.4				

图 5.23　个人电脑产品 QFD 矩阵表的一部分

5.1.7　企业管理支撑技术

与产品制造相关的决策也直接关系到了企业对产品生产的管理。人们逐渐开始使用能够将企业活动融入到产品制造决策中的支撑系统，如企业资源规划（Enterprise Resource Planning，ERP）。图 5.25 所示为 ERP 的概念。ERP 支持企业的整体运营，从最初的原料采购到充分利用企业效能、技术和人力资源来完成产品制造，再到最终把产品供应给客户。

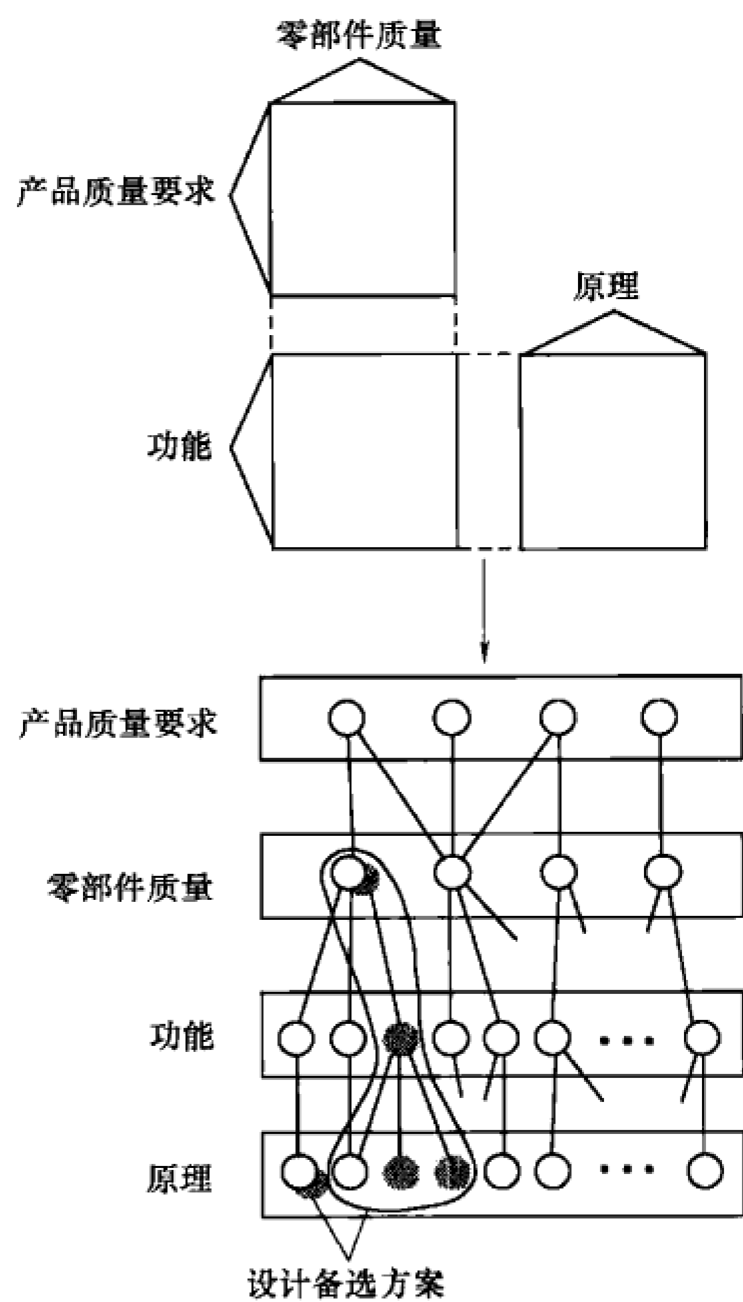


图 5.24　考虑 QFD 层次结构的设计方法概念图

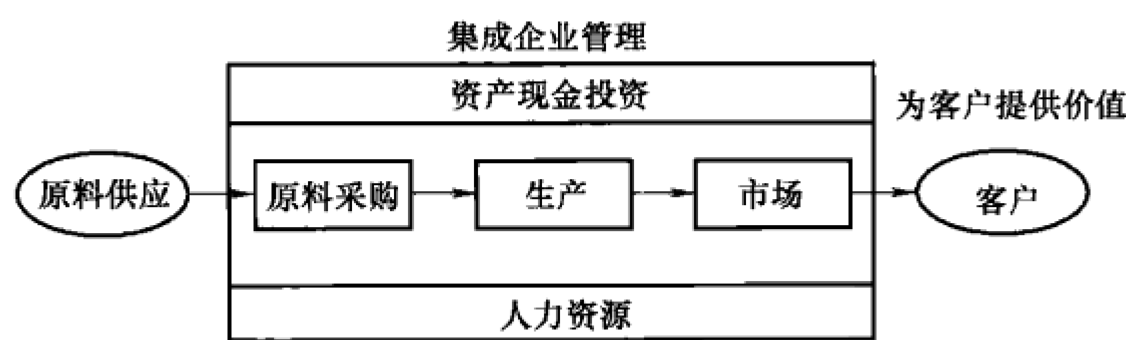


图 5.25　ERP 的概念

5.2　产品制造中信息技术的应用

在大型复杂的产品生产中，为了有效地开展系统设计，需要用到一些重要技术，如网络信息技术、通用数据库等，还要用到图 5.1 中第三层中的那些虚拟现实技术。

在20世纪50年代，企业在运营中开始使用电子计算机。当时，数据处理是其最主要的任务，电子计算机在20世纪60年代已应用于所有的工程和生产领域。20世纪60年代的后半期提出了管理信息系统（Management Information System，MIS）的概念，管理人员可以据此在特定时间内，以特定的形式获得企业管理决策所需的必要信息。在此之后，信息概念的重要性开始得到广泛认可，当数据接收者认为数据有用且有价值的时候，数据就变成了信息。20世纪70年代初期，人们提出了决策支持系统（Decision Support System，DSS）的概念，它可以支持人们制订决策，帮助高管和经理处理企业经营管理操作中的问题，及时作出正确的决策。信息系统是企业管理决策中的有效手段，这一概念广受欢迎。在随后的20世纪80年代后半期至今，战略信息系统（Strategic Information System，SIS）的概念得到了普及，当时的信息系统被用于日益发达的决策制订工作。

图5.26所示为基于数据收集的决策制订过程。数据挖掘（Data Mining）一词大约出现于1995年，其含义是从大量的累积数据中提取那些深埋其中有用的知识和信息，就像采矿一样，从大堆材料中寻找有价值的东西。

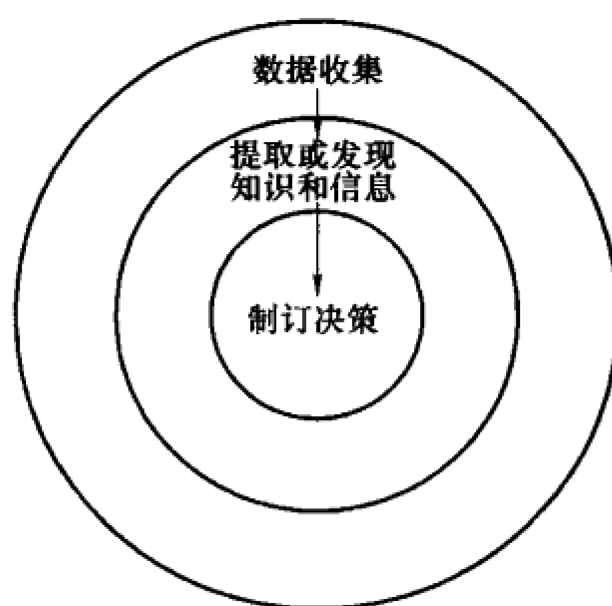


图5.26　基于数据收集的决策制订过程

在实施图3.5所示的并行工程时，所需的最重要的技术就是一个全面的数据库，用以收集数据、剔除重复的数据，并根据使用目的提高其适应性。尤为重要的是，这种数据库应该常规化，也就是说，众多的协同工作人员要能够随时访问并使用它。

现在，随着时间的推移，有竞争力的设计人员必须要迅速发现客户各种各样的需求，并开展更加高效、有用的设计活动。在这样的产品开发中，需要从不同的观点和角度评价产品，并要开发出在市场上能够脱颖而出的高质量产品。这样就需要不同领域的大量专家齐心协力地参与到各种精心策划的设计活动中。

当多个不同技术领域的专家参与到产品设计中时，设计问题就变得更为复杂和多样化。在这种情况下，相关专家最好能够同时用协作工具和方法来解决问题。信息技术，如网络化信息系统是一种不可或缺的交流途径。使用网络化信息系统进行合作，可以更容易地使拥有不同技术和知识的人聚在一起，即使他们分散于世界各地。因此，人们期待更好的决策系统能够早日到来。

图5.27所示为两名具有不同技术经验的人员（如结构设计师和控制设计师）相互交流的示意图，他们相互协作，完成满足客户需求的产品优化设计。

使用支撑系统非常有效，可让所有项目人员都共同参与完成耗时且复杂的工作。

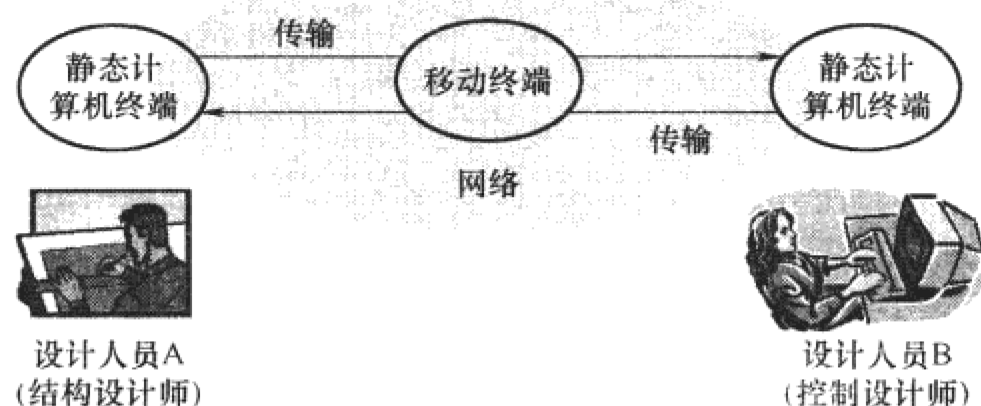


图 5.27　两名具有不同技术经验的人员（如结构设计师和控制设计师）相互交流的示意图

在图 5.27 中，专家的活动可由计算机硬件提供支持，也可由通过网络连接到专家计算机的软件提供支持。这些移动终端提供了一种分散的沟通技术，在其中，操作软件程序就像在联网的计算机上工作一样。在适当的专家用网络系统进行合作变得越来越高效，越来越具有吸引力，另外，未来使用更广博和更精确的知识进行更好的设计活动更值得期待。在这种情况下，进一步使用诸如代理终端这样的高级支撑系统很有必要[31-33]。在产品的整个生命周期中，收集数据并从中提取有用的信息和知识、数据和信息收集、信息显示和应用已无处不在，无数人正在将这一概念付诸实践。

上述内容是关于信息网络和普通数据库信息系统的技术。还有另外一种信息系统技术，即虚拟现实技术（VR），它通过传感器为人类呈现一个人工合成的虚拟世界。这些传感器的输入信息可以刺激人类的想象，使人们能够与设计对象进行动态的沟通和交流。

虚拟现实技术被定义为一种计算机信息合成技术，它整合了人类的视觉、听觉和感觉器官，创造出了一个令人信服的外在虚拟世界[34-37]。虚拟现实技术允许人们进入图形空间，并操纵空间中看起来特别逼真的物体，还允许人们在收到适当的感觉反馈时，与这种虚拟世界中的对象进行交互。这都要归功于复杂的软、硬件系统。在产品制造中，使用虚拟现实技术具有以下优点：

① 可以从系统化的角度对产品进行设计，有利于使用人的一系列感观，如视觉、听觉和触觉等。

② 可以得到更适合于使用环境的产品设计方案。

③ 可以从系统的观点理解产品的制造过程。

④ 设计人员和客户可以虚拟化地体验产品使用情境。

⑤ 可以充分研究客户的需求和对产品的要求。

⑥ 更有利于产品设计和开发期间的协同工作。

⑦ 可以实现远程控制，远程管理在地理位置上分散的制造工厂。

VR 技术有望应用实际的设计、制造、销售等环节中的决策过程，人们可以在用数据和信息合成的虚拟空间中检查和操纵产品对象。

思考题

5.1 试比较 CAE 简化模型和细化模型的应用效果，然后讨论如何用简化模型促进搜索更优设计解。

5.2 试论在分组协同的支撑系统中显示和排列产品创意的详细要求。

5.3 试论在开发新产品设计时，使用包含以往知识和经验的数据库的效用和价值。

5.4 试论按照顺序解决产品制造过程中的瓶颈和获得全局优化解的关系。

5.5 试论可以降低产品制造成本而不损害产品质量的制造方法。

5.6 为什么在生命周期设计中要考虑零件的重用和回收？为什么说评估装配和拆卸的难易度很重要？

5.7 试论最大限度地减少一组工艺流程的总加工时间和最大限度地简化一组工艺流程中的某个工艺过程所用时间的关系。

5.8 为什么在最大限度地提高客户满意度时，必须收集对产品的一系列制造要求并分类？

5.9 试论如图 5.25 所示的能全面支持企业管理的系统所能带来的潜在效益。

5.10 试论人类生理感官的细节认知如何影响产品形态描述技术的发展？

5.11 解释 GT 的作用，说明在降低产品制造成本的同时允许产品多样化的模块设计的作用。

5.12 总结 GT 和模块技术之间的相同点和不同点。

5.13 解释并行工程中网络信息系统和产品制造活动中协同的作用。

参考文献

1. Narahara H, Saito K (1996) Shape analysis of solidified photopolymer for the three dimensional photofabrication. International journal of JSPE, 30(4):311–316
2. Lemon JR, Tolani SK, Klosterman AL (1980) Integration and implementation of computer-aided engineering and related manufacturing capabilities into mechanical product development Process. Gi-Jahrestagung, Saarbrucken, Federal Republic of Germany, October 1
3. Azegami H, Takeuchi K (2006) A smoothing method for shape optimization: traction method using the Robin condition. International journal of computational methods, 3(1):21–33

4. Osborn AF (1979) Applied imagination. Charles Scribribner's Sons, New York
5. Kawakita J (1967) The way of thinking (in Japanese). Chu-Kou Shinsho
6. Kobayashi M, Yoshimura M, Nishiwaki S, Izui K (2003) A method for supporting creative interaction during collaborative design. In: Proceedings of DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA, DETC2003/DAC-48223, September: 1–10
7. Kobayashi M, Yoshimura M, Nishiwaki S, Izui K (2004) Collaboration support system based on visualization of communication processes. In: Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DET C2004-57785:1–7
8. Terninko J, Zusman A, Zlotin B (1998) Systematic innovation: an introduction to TRIZ (Theory of inventive problem solving). St. Lucie Press
9. Goldratt EM, Cox J (1992) The goal – a process of ongoing improvement. North River Press
10. Taguchi G (1993) Taguchi on robust technology development. ASME Press, New York
11. Parkinson A, Sorensen C, Pourhassan N (1993) A general approach for robust optimal design. Transactions of the ASME, Journal of mechanical design, 115: 74
12. Parkinson A (1995) Robust mechanical design using engineering models. Transactions of the ASME, Journal of mechanical design, 117: 48
13. Doltsinis I, Kang Z (2004) Robust design of structures using optimization methods. Computer methods in applied mechanics and engineering, 193:2221
14. Boothroyd G (1979) Design for economic manufacture. Annals of the CIRP, 28(1):345–350
15. Boothroyd G, Dewhurst P, Knight P (1994) Product design for manufacture and assembly. Marcel Dekker
16. Mitrofanov SP (1966) Scientific principles of group technology, part I. National Lending Library of Science and Technology, Boston
17. Yoshimura M, Hitomi K (1986) Application of group technology to design optimization of machine structural systems. Transactions of the ASME, Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design, 108(1):3–9
18. Yoshimura M, Itani K, Hitomi K (1989) Integrated optimization of machine product design and process design. International journal of production research, 27(8):1241–1256
19. Chryssolouris G (2006) Manufacturing systems – theory and practice. Springer-Verlag, New York:183–217
20. Otto KN, Wood KL (2001) Product design – techniques in reverse engineering and new product development. Prentice Hall, p.370
21. Fujita K, Yoshida H (2004) Product variety optimization simultaneously designing module combination and module attributes. Concurrent engineering – research and applications, 12(2):105–118
22. Hitomi, K (supervisor), Nakajima K, Yoshimura M, Yoshida T (eds) (1993), Fundamentals of CIM – Design, Manufacturing, and Management by Computers (in Japanese), Kyoritsu-Shuppan
23. Hitomi K, Yoshimura M (1986) Operations scheduling for work transportation by industrial robots in automated manufacturing systems. Material flow, 3:131–139
24. Hitomi K, Yoshimura M, Morimoto (1984) Optimal scheduling for manufacturing systems with industrial robots. In: Computer-integrated manufacturing and robotics published in a bound volume at the ASME Winter Annual Meeting, 11pp., December
25. Papadimitriou CH (1982) Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice-Hall
26. Baker KR (1974) Introduction to sequencing and scheduling. Wiley, New York
27. French S (1982) Sequencing and Scheduling: an Introduction to the Mathematics of the Job-Shop. Ellis Horwood
28. Yoshimura M, Takeuchi A (1994) Concurrent optimization of product design and manufacturing based on information of users' needs. International journal of concurrent engineering: research and applications, 2(2):33–44

29. Akao Y (1990) QFD – integrating customer requirements into product design. Productivity Press
30. Otto K, Wood K (2001) Product design. Prentice Hall:289–300
31. Danesh MR, Jin Y (2001) An agent-based decision network for concurrent engineering design. Concurrent engineering: Research and applications, 9(1):37–47
32. Eynard B, Liénard S, Charles S, Odinot A (2005) Web-based collaborative engineering support system: applications in mechanical design and structural analysis. Concurrent engineering 13(2):145–153
33. Yoshimura M, Takahashi K (2001) Collaborative design among different fields in mobile-agent environments. International journal of concurrent engineering: Research and applications, 9(2):146–154
34. Okulicz K (2004) Virtual reality-based approach to manufacturing process planning. International journal of production research, 42(17):3493–3504
35. Benhabib B (2003) Manufacturing – design, production, automation, and integration. Marcel Dekker, p.128
36. Ong SK, Yuan ML, Nee AYC (2008) Augmented reality applications in manufacturing: a Survey. International journal of production research, 46(10):2707–2742
37. Westkämper E (2007) Strategic development of factories under the influence of emergent technologies. Annals of the CIRP, 56(1):419–422

第 6 章　产品制造的优化技术

如第 5 章所述，产品设计与制造的支撑技术正蓬勃发展，但某些技术的应用以及在第 2 章所述标准下建立理想决策方法都还存在着一些问题。在未来的产品制造中，理性且有效的决策将更依赖于优化技术。适当的优化方法是用支持系统制订最佳决策所必不可少的。本章将介绍当前的一些产品设计优化技术，并给出同时适用于简单和复杂情况的基本优化方法和策略，同时还要介绍系统设计的优化，最后还提供了在仔细且完全理解目标以后构建、描述优化问题的方法。在解释实用的产品设计优化方法时，作者特别强调了一点：一定要避免用自动化或公式化的方式实施优化技术。

6.1　基本的优化技术和实施困难

在机械产品设计中，需要评估例如制造成本、运行精度、运行效率以及运行能量需求之类的产品特征。正如第 2.2 节所述，这些特征可以粗略地分为两类：需要改进其值的特征和需要为其定义特定约束的特征。为了获取那些能满足这些需求的合理设计解，需要定义如第 2.3 节所述的优化问题。诸如数学规划方法和遗传算法（Genetic Algorithm，GA）正茁壮发展，各种各样的优化问题的求解也更加简单，但所得解是否是真正的全局优化解仍然无法确定。此外，为了提高复杂问题的优化效率，人们正积极主动地研究并应用基于试验设计的响应面法（Response Surface Method）来寻求最优解。在此方法中，利用最少采样点就可以得到设计变量的特征响应面。

现在已有很多学者出版了关于设计优化方法的著作，其中主要包括 Johnson[1]、Wilde[2]、Haug and Arora[3]、Siddall[4]、Vanderplaats[5]、Haftka and Kamat[6]、Papalambros and Wilde[7]、Arora[8] 以及 Mastinu，Gobbi，and Miano[9] 等。本章将讨论产品制造的优化技术。

6.1.1　线性规划问题

如果优化目标和约束函数都可以表述为设计变量的线性函数，那么这类问题就称为线性规划问题（Linear Programming Problem）。当可用解集存在于设计变量空间时，这类问题就变成了局部优化问题，可以用单纯型法（Simplex Method）或其他方法很容易地进行求解。在经济学中，利润和成本通常都可以表述为线性函数，因此常用线性规划方法来求解。产品设计与制造中的问题很少能表述为线

性规划问题。尽管如此，在利用线性逼近来求解非线性规划问题时，通常也会用到线性规划方法。

6.1.2　非线性规划问题和局部优化解

如果有一个或多个优化目标和约束函数可以表述为设计变量的非线性函数，这类问题就称为非线性规划问题（Nonlinear Programming Problem）。在非线性规划问题中，可用设计变量空间中可能存在大量的局部优化解。通常，非线性规划方法首先设定初始设计变量，然后利用这些变量来搜寻那些最小化或最大化目标函数的设计解。通过这种方法得到的解属于局部最优解（Local Optimum Solution）。通常，很难确定某个特定解是否是全局最优解。

图 6.1 所示为非线性优化问题的设计变量空间和局部最优解。图中给出了需要最小化目标函数的等高线和约束条件的边界线。当不存在约束时，从目标函数的等高线可以看出，局部最优解在点 A、B、C 和 D 处。当可用域被定义为 $g_1 \leqslant 0$ 时，可用解位于 $g_1=0$ 曲线的右下方；当可用域被定义为 $g_2 \leqslant 0$ 时，可用解位于 $g_2=0$ 曲线的右上方。图中的阴影区域为可用设计变量空间。

点 A 周围的局部最优解就是边界线 $g_1 \leqslant 0$ 上的点 A'，点 C 周围的局部最优解就是边界线 $g_2 \leqslant 0$ 上的点 C'。因此，可用的设计变量空间中共存在 4 个局部最优解 A'、B、C' 和 D。其中，拥有最小目标函数值的解才是全局最优解。

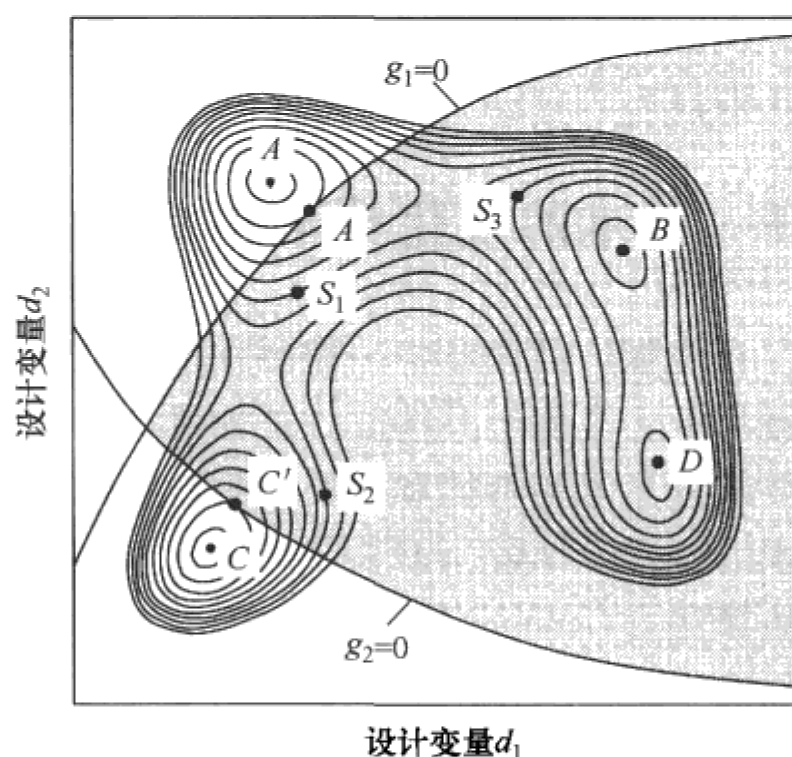


图 6.1　非线性优化问题的设计变量空间和局部最优解

求解非线性规划问题有很多种方法。在序列线性规划（Sequential Linear Programming）算法的每个求解步骤处，非线性优化问题有序地近似于线性规划问题；而在序列二次规划（Sequential Quadratic Programming）方法的每个求解步骤处，非线性优化问题有序地近似于二次优化问题。在罚函数法（Penalty Function Method）中，为目标函数增加一个惩罚项，可以把带约束的优化问题转变为无约束优化问题来求解。通过改变响应参数，可以有序地求解此类问题。基于罚函数法的序列优化算法称为序贯无约束求极小值法（Sequential Unconstrained Minimization Technique，SUMT）。

在上述优化方法中，首先要在设计变量空间中设定一个初始点。当初始点设定为 S_1 时（如图 6.1 所示），就可以得到局部最优解为 A'。当初始点设定为 S_2、

S_3 时，也可以相应地得到局部最优解分别为 C' 和 B。但实际的优化问题更复杂，很难判断通过优化方法得到的解是否是全局最优解。

如第 2 章所述，如果非线性优化问题的目标函数为 f，不等式约束为 $g_j \leqslant 0$ $(j=1, 2, \cdots, m)$，就可以将其表达为

$$f(d) \rightarrow \text{minimize or maximize} \tag{6.1}$$

$$g_j(d) \leqslant 0, \qquad j=1, 2, \cdots, m \tag{6.2}$$

拉格朗日函数 L 可以用拉格朗日乘子 μ_j 表示为

$$L = f + \sum_{j=1}^{m} \mu_j g_j \tag{6.3}$$

为了判断给定点 d^* 是否是优化问题的局部最优解，需要用一个条件——KKT 条件（Karush-Kuhn-Tucker Condition）[10,11] 来判断局部最优性，它必须满足：

$$\frac{\partial L}{\partial d^*} = \frac{\partial f}{\partial d^*} + \sum_{j=1}^{m} \mu_j \frac{\partial g_j}{\partial d^*} = 0 \tag{6.4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_j} \leqslant 0, \; j=1, 2, \cdots, m \tag{6.5}$$

$$\mu_j \geqslant 0, \; j=1, 2, \cdots, m \tag{6.6}$$

$$\mu_j^T g_j, \; j=1, 2, \cdots, m \tag{6.7}$$

公式（6.4）右边的第一项是目标函数在点 d^* 处的梯度，第二项是点 d^* 处约束函数梯度之和，每一个约束函数的梯度都有一个拉格朗日乘子 μ_j，且所有的乘子都非负，其值可以划分为两类：$\mu_j > 0$ 和 $\mu_j = 0$。

当 $\mu_j > 0$ 时，公式（6.7）中的约束函数 g_j 必须满足 $g_j = 0$。在点 d^* 处，约束条件开始生效。根据起作用的约束条件不同，存在有很多种情况，但有效约束和 KKT 条件都没有满足，点 d^* 即是可用解集区域内的局部最优解。

当只存在有一个约束条件时，拉格朗日函数 L 可以表示为

$$L = f + \mu g \tag{6.8}$$

以结构优化问题为例，当把某机器结构的静态刚度（Static Rigidity）k_s 作为目标函数，把结构重量 W 作为约束函数 g，此优化问题就可以表示为

$$k_s \rightarrow \text{maximize} \tag{6.9}$$

$$g = W - W^U \leqslant 0 \tag{6.10}$$

上述优化目标也可以表示为最小化问题：

$$-k_s \rightarrow \text{minimize} \tag{6.11}$$

拉格朗日函数 L 则表示为

$$L = -k_s + \mu W \tag{6.12}$$

对于公式（6.4）中的 KKT 条件，必须满足以下等式才能把 d^* 点作为局部

最优解：

$$-\frac{\partial k_s}{\partial d^*}+\mu\frac{\partial W}{\partial d^*}=0 \tag{6.13}$$

因为静态刚度 k_s相对设计变量呈单调性，所以$\frac{\partial k_s}{\partial d^*}$恒为正值。也就是说，$k_s$的值随着设计变量值的增大而增大，反之亦然。结构重量 W 对于设计变量也呈相似的单调性，因此$\frac{\partial W}{\partial d^*}$也恒为正值。

如上所述，拉格朗日乘子 μ 的值必须大于等于 0，才能保证点 d^* 是局部最优解。对于上述例子中的 k_s和 W，当拉格朗日乘子 $\mu>0$ 时，公式（6.7）中的 $g=W-W^U=0$，把产品重量作为约束，就可以得到局部最优解；当 $\mu=0$ 时，由于不满足公式（6.13），不存在局部最优解。在这个例子中，我们把静态刚度作为目标函数，把结构重量作为约束函数，存在单一的局部最优解，因此可以把这个局部最优解作为全局最优解。如果把结构重量作为目标函数，把静态刚度作为约束函数，这一结果仍然有效，因为这两个产品特征都相对于设计变量单调。

我们再来看另外一个结构优化的例子。当把某机器结构的动态刚度（Dynamic Rigidity）k_d作为目标函数，把结构重量 W 作为约束函数 g，此优化问题可以表示为

$$k_d \rightarrow \text{maximize} \tag{6.14}$$

$$g=W-W^U\leqslant 0 \tag{6.15}$$

对于公式（6.4）中的 KKT 条件，必须满足等式（6.16），才能把点 d^* 作为局部最优解：

$$-\frac{\partial k_d}{\partial d^*}+\mu\frac{\partial W}{\partial d^*}=0 \tag{6.16}$$

当拉格朗日乘子 $\mu>0$ 时，与上一个例子中的静态刚度相同，存在有局部最优解。即使拉格朗日乘子 $\mu=0$，$\frac{\partial k_d}{\partial d^*}$也可以等于零。因此，在可用解集空间中存在有局部最优解，它可能在可用空间中关于约束条件的局部最优解旁边[12]，其原因在于动态刚度 k_d对于设计变量呈非单调性。

6.1.3 多目标优化问题

如第 2.3 节所述，在把实际问题表述为优化问题的过程中，设计师常常必须处理大量的设计要求条件。此时就可以把优化问题表示为多目标优化（Multiobjective Optimization）问题，它拥有多个目标函数[13]。

图 6.2 所示的多目标函数空间有两个目标函数：f_1 和 f_2，它们含有相同的设计变量。目标函数 f_1 的最小值点 A 与目标函数 f_2 的最小值点 B 不一致，多目标优

化问题的最优解集位于连接 A、B 两点的粗实线上。线 AB 上的每一个解集都会在接近于一个目标函数的解的同时远离另外一个目标函数的解，这些解集称为帕累托最优解（Pareto Optimum Solution）。

如果点 A 和点 B 重合，一个目标函数的优化将同时可以优化其他目标函数。在这种情况下，就不需要用把实际优化问题表述为多目标优化问题。图 6.2 中的点 I 同时是两个目标函数的最小值点，称为理想点（Ideal Point）或乌托邦点（Utopia Point），但这一特殊解是无效的，它处于可用设计解区域之外。

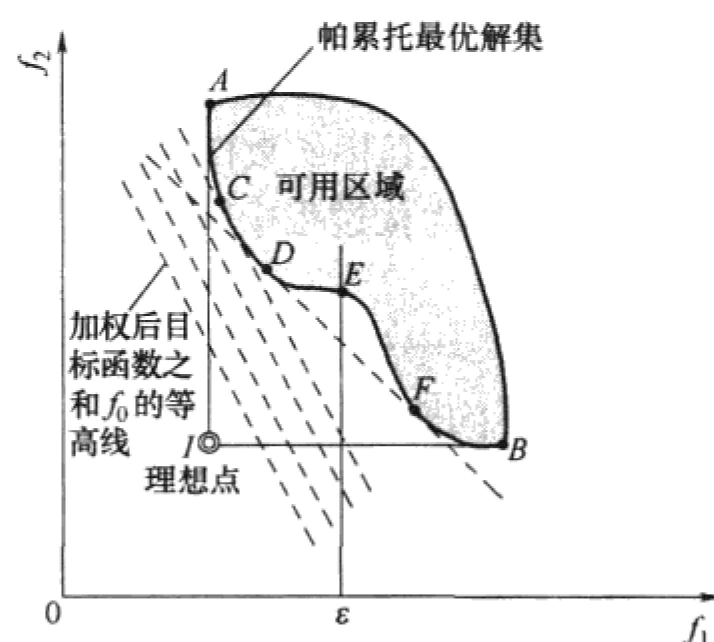


图 6.2　多目标函数空间和帕累托最优解集

求解多目标优化问题的最基本程序是：首先获取帕累托最优解集，然后量化评估目标函数之间的冲突关系。以下是一些获取帕累托最优解集的方法。

（1）加权总和法（加权法）

在这种方法中，按照下式分别赋予f_1和f_2一个权重系数ω($0\leqslant\omega\leqslant1$，$\omega\geqslant0$)，加权后目标函数之和$f_0$为

$$f_0=\omega f_1+(1-\omega)\ f_2 \tag{6.17}$$

在图 6.2 所示的多目标函数空间中，f_0表示为对于特定 ω 值所得的虚直线。所得解可以使f_0拥有位于帕累托最优解内的最小值。通过在 0～1 范围内逐步递增 ω 值，并求使得f_0拥有最小值的解，就可以得到位于点 A 和 B 之间的帕累托最优解集。

在这种方法中，必须要特别注意每个目标函数的单位，因为它们有可能是不相同的，例如某个函数表示重量，而另一个函数则表示成本，把类似的函数进行简单相加是不合逻辑的。此时，要对所有目标函数进行标准化处理，这样可以得到无量纲的值。实现这样的目标有很多种方法，典型的方法是利用目标函数在理想点f_i'处的值把目标函数f_i表示为f_i'，那么目标函数的最大值$f_i^{\max}$就是：

$$f_i'=\frac{f_i-f_i'}{f_i^{\max}-f_i'} \tag{6.18}$$

如图 6.2 所示，当帕累托最优解曲线在某处向可用区域内凹时，通过改变权重系数值，可以获得内凹部分的帕累托最优解。但在实际的产品设计优化中，这种情况非常少见。需要特别注意的是，在实际的优化问题中可能存在无法用加权总和法获得帕累托最优解的区域，此时可以用 ε 约束法（ε-Constraint Method）求解。

(2) ε 约束法/有界目标函数法

在这种方法中，从多个目标函数中选择一个目标函数，将其定义为所要求解的目标函数，把其他目标函数作为优化求解的约束条件。把每个约束函数的上限设定为 ε。在有序的优化过程中逐步增加 ε 的值，就可以一步步得到有用的帕累托最优解。

我们来看一个例子。对于包含两个目标函数的优化问题，把 f_1 作为约束时，就可以把优化问题表示为

$$f_2 \rightarrow \text{minimize} \tag{6.19}$$

$$f_1 \leqslant \varepsilon \tag{6.20}$$

以上表示约束条件也受原始优化问题的约束。

在图 6.2 中的 f_1 轴上优化 ε，可以得到点 E 处的帕累托最优解。优化过程以迭代方式进行，从点 A 处 f_1 的值开始，以 $\Delta\varepsilon$ 为增幅递增改变 ε 的值，一直持续到 B 点的 f_1 值，这样可以求得 A、B 两点间的帕累托最优解集。即使帕累托最优解曲线在点 D、F 中间有内凹（如图 6.2 所示），也可以求得内凹部分的帕累托最优解。当多目标优化问题拥有三个或更多个目标函数时，除了被选为目标函数之外的评价函数，还要把其他评价函数作为约束函数。按照上述方法为每个约束定义不同的 ε 值，逐步增加不同的 ε 值，就可以得到帕累托最优解集。

6.1.4 包含离散变量的优化问题

鉴于某些设计要点在优化过程中的详细设计阶段之前已确定，产品形状通常在详细设计阶段确定。在这种情况下，设计变量通常表示为连续设计变量，可以用传统的线性或非线性规划方法来求解。然而，当设计变量中包含有离散变量，如材料种类、加工方法、生产方法等，优化问题就变成了离散变量的优化问题（也称为组合优化问题）[14-17]。

对于包含离散变量的优化问题，枚举法（Enumeration Method）通过列举离散变量所有可能的组合形式来求最优解。它用非线性数学规划方法求解，然后从所得解中选择出最优解，这一过程对计算能力的要求非常高。图 6.3 所示为两函数空间中的离散可用解区域。8 种材料离散地分布在表示结构刚度和结构重量的二维函数空间中。为了尽可能高效地获取这些离散问题的最优解，通常使用分枝界限法（Branch-and-Bound Method）来求解。

使用分枝界限法的目的是尽可能地去掉以下两个过程中不必要的计算：把可用解分解成子解集的分枝过程和为每个子解集计算上下界限值的分界过程。

分界操作非常重要，假如：

① 已获取某个子解集的最优解，就不需要为这个子解集再进行分枝操作。

② 已确定某个子解集以及由它产生的子解集都不能为初始问题提供最优解，就不需要为这个子解集再进行分枝操作。

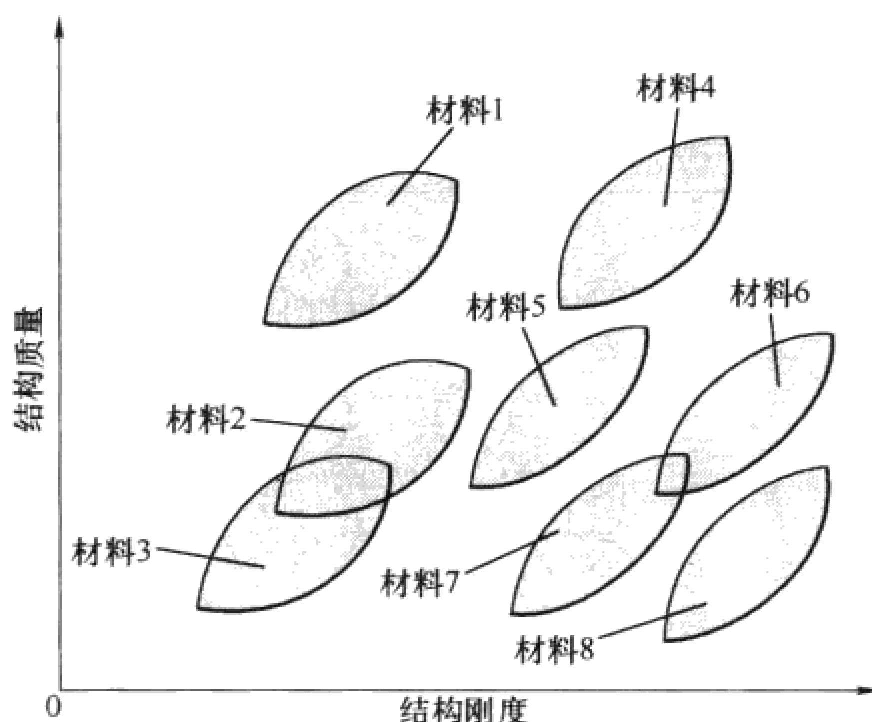


图 6.3　两函数空间中的离散可用解区域

如果这两个条件中的任意一个在枝节点处满足，此节点就为最终节点，不再分枝。因此，要设定评价标准，以评估这两个条件是否已满足。另外，未终止分枝的子解集称为活动节点。当不存在任何活动节点时，终止优化解的搜索过程，从备选的优化解中选出的最优解就是原始问题的最优解。

在第 5.1.5 节中，作者以 FMC 系统的运行调度为例介绍了调度技术，问题是确定工业机器人的最佳工件传输顺序。此处用图 6.4 解释了分枝界限法的应用过程[18]。在图 2.4 所示的制造单元中，三个机床安装在制造四种类型零件的加工环节，制造单元中心处的工业机器人用来传输零件。

在图 6.4 中的最顶层，解集 S_0包括了所有可用解，它被分解成数个子解集。因为有四种零件被传输到机床 1，包括这些零件的子集分别为 S_1、S_2、S_3、S_4。零件有序地从子集 S_1、S_2、S_3、S_4传输到机床 1。在图 6.4 中，每个分枝都连接到一个节点处，在节点 i 处的下边界为 LB_i，任何传输序列所需的最大完工时间都不可能小于下边界值。

LB_1、LB_2、LB_3和 LB_4中，拥有最小值的子集可作为进一步搜索的范围，下一次分枝在此子集处开始。当 S_3子集的下边界值是 S_1、S_2、S_3、S_4中最小的值时，下一次分枝子集为 S_5、S_6、S_7。重复这种分枝过程，如果某子节点的下边界值比当前搜索中所有活动节点拥有的下边界值都小，分枝就在此节点处终止。

在重复类似的分枝操作过后，如果在节点 m 处得到了零件传输的完整顺序解，这个节点就是当前的最优解。节点处的下边界值 LB_m就是最大完工时间的目标函数值。在活动节点中，其值等于或大于 LB_m的节点就变成终止节点，不需要再为它们进行分枝操作。然后在活动节点中重新为拥有最小下边界值的节点进行分枝操作。当节点 n 拥有新的最优解，且其他节点的下边界值都大于 LB_n，节

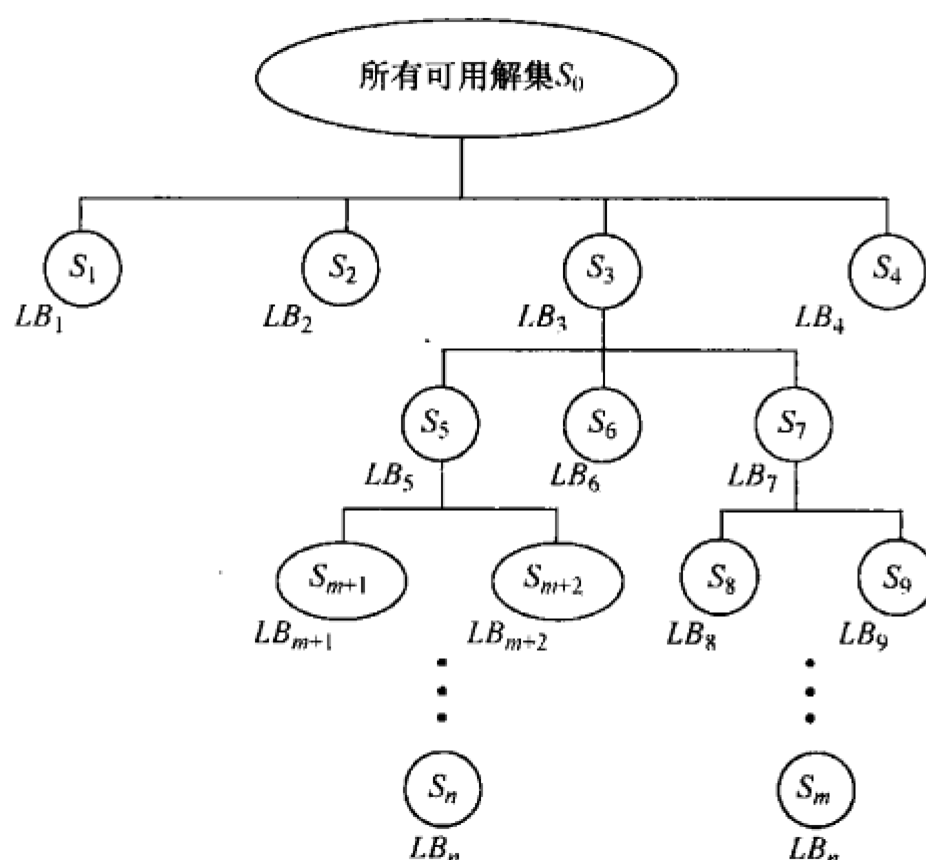


图 6.4　分枝界限法

点 n处的解就是所求解问题的最优解。

分枝界限法的关键在于如何表示下边界。执行分枝和分界的方法并不唯一，但所用方法要适用于所求解的问题。枚举法在离散设计变量的所有可能组合中选择最优解。与其相比，分枝界限法能有效避免不必要的搜索过程。如果下边界的逻辑表示得当，所得解就是全局最优解。虽然分枝界限法有此优点，但对于拥有大量离散设计变量的问题而言，计算时间会随着离散设计变量的组合数量的增长呈几何式增长，使用这种方法很难显著地降低计算时间。在实际的计算过程中，用这种方法获得最优解会变得非常困难，因此一般使用遗传算法（Genetic Algorithm，GA）。它是一种启发式优化方法，下一节将对此进行介绍。分枝界限法对于评估启发式算法得到的解的有效性是必不可少的。

6.1.5　遗传算法

19 世纪 60 年代末 70 年代初，遗传算法在荷兰被提出[19]。它是一种模拟自然界生物在适应过程中的进化机制的人工模型。Goldberg 把这类人工模型变成了可用于优化过程的程序[20]。在使用遗传算法时，设计变量被表示为用二进制码描述的基因型，如图 6.5 所示。常见的设计变量称为表现型，从表现型到基因型的映射过程称为编码（Coding）。

正如生物在自然界中的进化一样，在所有个体中，更能适应环境的个体能形成一种特定的遗传再生现象，它比一般的个体存活概率大。另外，基因杂交和突变能在下一代中形成新个体。

图 6.5 所示为基因杂交，图中的“｜”是每个个体染色体的断裂标识。设

计变量 b_1 的两种个体相当于父代1和父代2，通过交换每个体染色体中断裂标识左边的部分，可以得到子代1和子代2。图6.6所示为根据一定概率发生的简单变异过程。基因中的“1”在箭头之后变成了“0”。

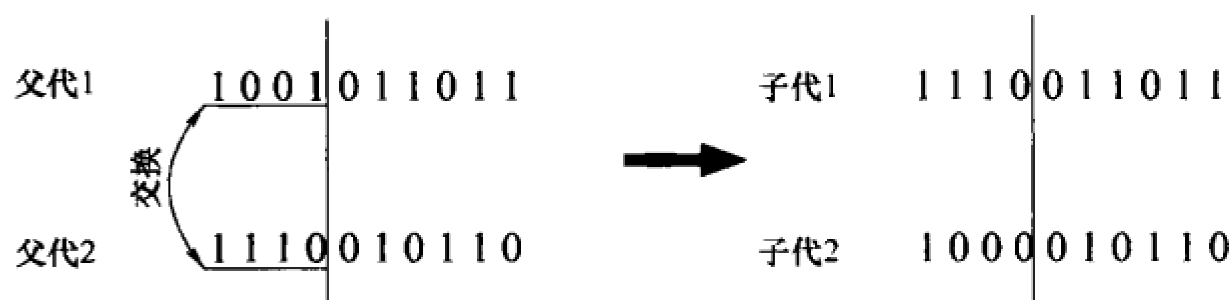


图6.5 基因杂交

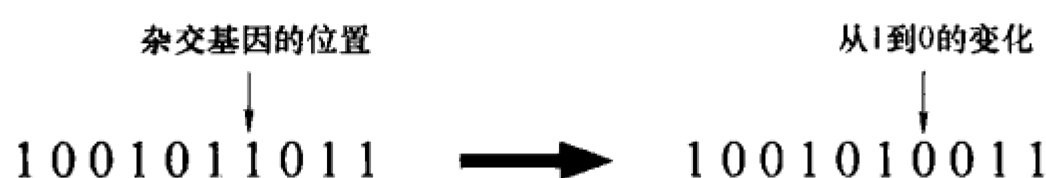


图6.6 根据一定概率发生的简单变异过程

如上所述，遗传算法模拟生物的进化过程，可作为一种优化工具使用，有助于寻求优化解。在应用遗传算法的过程中，多点搜索过程优于单点搜索过程，后者通常用于传统的数学规划方法。在遗传算法中使用概率算子时，要在确定性原则之外同时搜索多个点，也就是说，所得的解不一定就是全局最优解。

如第3.1、3.2节所述，当从较宽范围的可用解中选择最优设计解时，也就是在概念设计和基础设计阶段，通常把离散设计变量包括在优化公式的设计变量中。然而在实际的产品设计和制造中，对于包括离散设计变量的优化问题而言，很难有效地搜索其解决方案，但搜索过程却是非常重要的[21]。

6.1.6 大规模优化问题

正如在第3章所阐述的那样，为产品制造寻求更优的解决方案需要实施并行工程和协同技术。

有限产品种类的大规模生产规范化后，主要的评价标准是在保证产品性能和质量的同时降低制造成本。也就是说，优化的目标函数是产品制造成本。在车间任务型生产成为主流之后，产品制造模式得到了发展，以应对更为广泛的客户偏好。更多种类的产品被制造出来，它们在性能和制造成本方面各有千秋。在这种情况下，必须要使用多目标优化方法，才能同时把产品性能和制造成本包含在目标函数中。

另外，并行工程是进一步降低产品制造成本，提升产品性能与质量，缩短产品开发周期的基础。因为其概念使决策因素的优化更加容易，在产品开发的早期阶段，这些决策因素决定了如何才能从头到尾有效地实施产品的制造过程。在当前的产品设计过程中，环境因素和逐渐减少的自然资源日益受到重视，同时还有

产品的生命周期、潜在消费者的心理因素（如提升满意度的美学因素），这种情况下的优化问题变得更加复杂且庞大。

实际的产品设计问题通常包括第 6.1.1～6.1.6 节所介绍的大部门特征，如果没有对问题的复杂要求进行深层次考虑就构建优化问题的表达式，进而进行设计优化的过程，通常无法为实际的产品设计问题提供有效解，仅机械地实施传统的优化技术也无法提供有用的解决方案。

6.2　有效实施优化方法的基本策略

图 6.7 所示为利用 CAD 和 CAE 技术优化产品设计的流程。其中最重要的问题是如何用与优化对象相关的知识和信息来表述设计问题，如何评价所得优化解。优化方法在逻辑上可以为问题找出最优解。为了使优化过程有效，必须要实施以下方法：

① 从概念设计阶段开始就支持产品设计的决策。

② 理解并评价获得全局最优解的过程。

③ 判断所得最优解的有效性。

④ 支持额外的设计想法，以获取更优解。

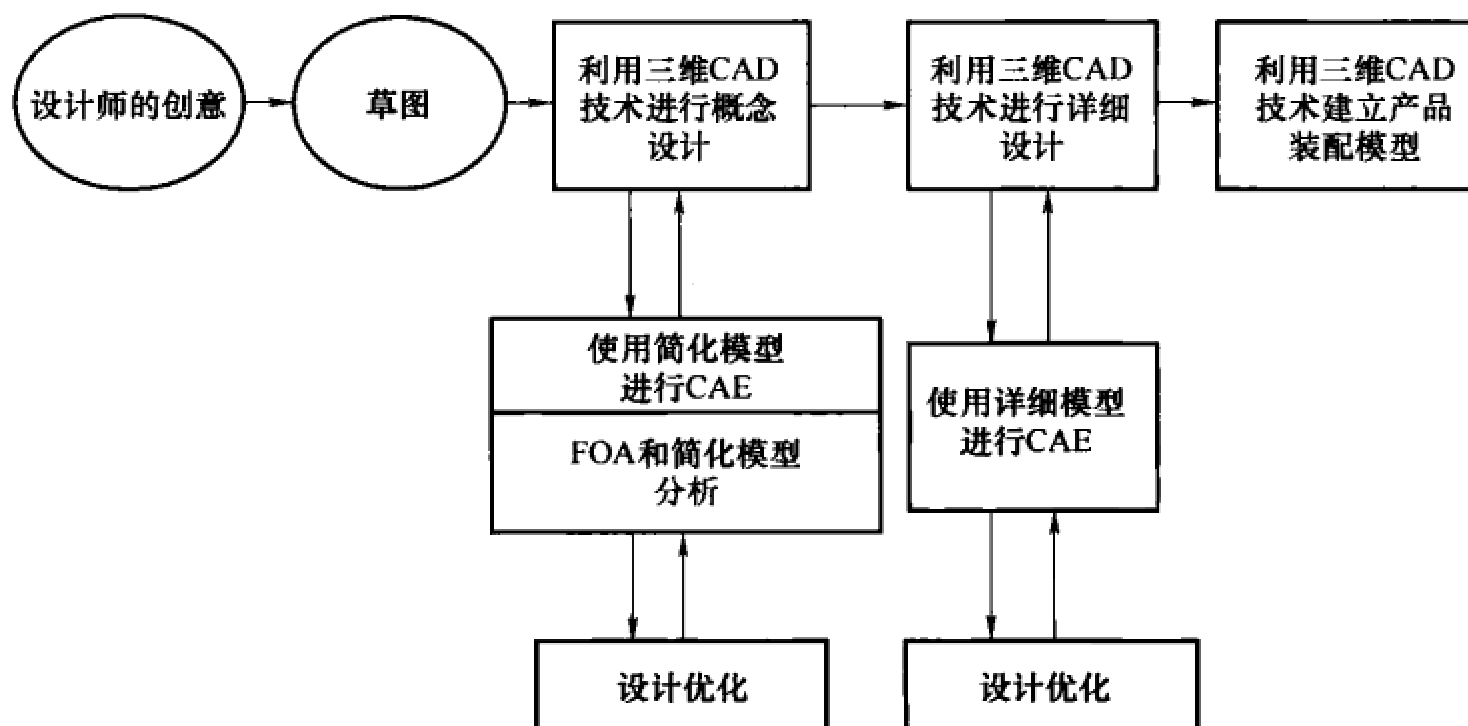


图 6.7　利用 CAD 和 CAE 技术优化产品设计的流程

以上第一个策略要求为设计目标建立简化或者理想模型，概念设计阶段会用到这些模型[22]。

另外，如第 3.2 节所述，优化目标的简化和理想化对于以下两种情况是必不可少的：为包含有很多局部优化解的实际设计问题寻求全局最优解和从包含有很多设计创意的抽象设计目标中选取最好的设计解。

以下是一些设计目标简化的例子：

① 从以往经验或先前的试验中获取具体的设计特征值，把设计目标定为接近于某个常数值。

② 把一系列设计变量转换成一个独立的或更少的设计变量。

③ 把多自由度的系统近似转换成单自由度系统。

④ 把复杂的设计特征表示为数个简单特征的组合形式。

⑤ 忽略那些对设计结果影响不大的设计特征。

⑥ 当两个特征中的某一个占主导地位，或者两者存在层级关系时，在确定下一级特征之前，先确定上一级或占主导地位的特征。

⑦ 把实际的设计模型转化成等效的简化模型。

⑧ 用诸如"横梁"之类的简化元素为结构元件建模。

表 6.1 所示为基于简化、优化并实施流程的设计优化过程[23,24]。首先建立与实际结构等效的简化数学模型或模拟模型，其中包含了产品的结构特征。图 6.8 的左边是某个机器工具某部分结构的横截面；右边是等效的简化模型，它包含有简化后的箱型结构元件，与简化前的模型拥有相同的横截面特征。如果对左边未简化的模型进行优化，除了外表的结构元件（如内部加强筋和其间的空间划分）之外，还有大量的设计变量需要考虑，所得的结果只能是在保持原有形状的情况下改变尺寸大小，这种程度的改进离理想结果还很远。对简化后的模型进行优化能够更容易地得到整个结构的优化解，在实际的优化过程中也能得到结构形状的更优解。在右边的简化模型中仅有 4 个设计变量：2 个结构原件的横截面宽度和 2 个侧板的厚度。也可以对结构的连接进行简化，从而建立完整的简化机器结构模型。

表 6.1　基于简化、优化并实施流程的设计优化过程

第 1 阶段	简化	步骤 1	把机器的完整结构拆分成结构元件和连接件
		步骤 2	简化结构元件
		步骤 3	简化连接
		步骤 4	建立完整的机器结构模型
第 2 阶段	优化	步骤 5	优化完整的机器结构模型
第 3 阶段	实施	步骤 6	对设计变量进行敏感分析
		步骤 7	优化结构元件
		步骤 8	优化连接
		步骤 9	综合分析整个机器结构并评估

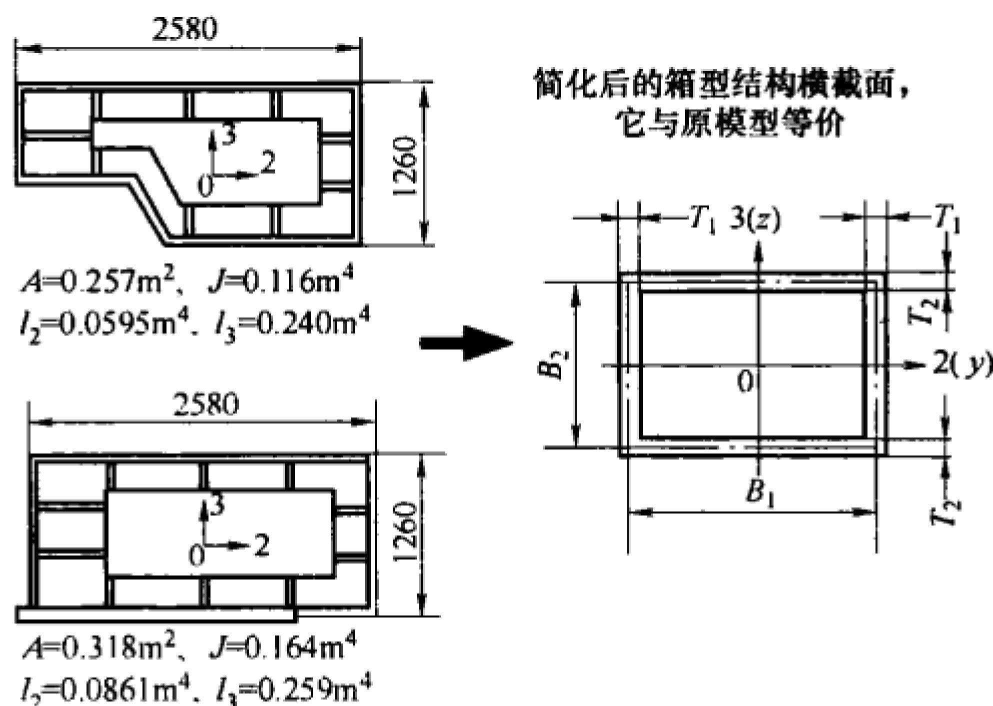


图 6.8　横截面形状的简化

在表 6.1 所示的第二个阶段中，对完整的结构模型进行优化。由于优化模型已极大地降低了原始模型设计变量的个数，因此可以使用线性规划优化方法求解。这样，收敛到不符合要求的局部最优解的几率也会降到最低。

在最后的第三阶段——实施阶段中，为所有的次级结构确定详细的结构形状和尺寸，同时还要进行额外的细节设计，以满足产品的功能要求。

此过程中的“简化”指把相关的问题分解为更小、更简单的问题，把实际的结构特征转化为简化特征。如果这样做可行，为分层结构和包括简化后子问题的结构组实施优化。在完成了此类的初始优化问题转化之后，就可执行复杂的优化，并一步步求解全局优化问题，最终求得最优解。

6.3　系统优化的基本方法

对于包括多种评价因素的大规模优化问题，其求解方法可分为两种：

① 对大量设计特征和任务进行排序，根据优先度和相互关系进行求解。

② 同时对所有相关设计特征进行全面优化。

6.3.1　任务执行顺序的决策和评价特征的优化

容易受决策影响的设计项通常都相互关联。不能独立地确定这些相互关联的项，必须先明确这些项之间关系的优先顺序，然后再对其进行详细考虑。

Steward 提出了 DSS(Design Structure System，设计结构系统)方法。如果要处理的任务组存在复杂的先后关系，该方法能给出最优的执行顺序，支持构建大规模设计问题的最优规划[25]。后来，该方法得到了改进，并被重新命名为 DSM (Design Structure Matrix，设计结构矩阵)方法。DSS 和 DSM 方法根据评价任务和

所要评价特征之间关系的重要程度对其进行排序[26]。

DSM 方法的流程如下[27]：

① 从左上角开始对任务 $t_k(k=1, 2, \cdots, r)$ 排序。当上方行中某项任务要优先于左边列中某项任务执行时，在交叉处放置一个“+”标记，以此来说明这两项任务的先后关系。表 6.2 所示为执行任务的顺序，表中的任务 t_1 和 t_9 必须在任务 t_3 之前完成。表 6.3 所示为原始优先顺序矩阵。

表 6.2 执行任务的顺序

任务	在此之前要完成的任务
t_1	None
t_2	t_3
t_3	t_1、t_9
t_4	t_2、t_8
t_5	t_1、t_7
t_6	t_4、t_8
t_7	t_1
t_8	t_2、t_5、t_9
t_9	t_1
t_{10}	t_3、t_5、t_7

表 6.3 原始优先顺序矩阵

j \ i	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}
t_1	–									
t_2		–	+							
t_3	+		–						+	
t_4		+		–				+		
t_5	+				–		+			
t_6				+		–		+		
t_7	+						–			
t_8		+			+			–	+	
t_9	+								–	
t_{10}			+		+		+			–

② 重新对矩阵的行和列排序，使得所有“+”位于矩阵对角线的下方。表6.4所示为重新排序后的矩阵。表左边从上到下的任务序列即是最具效率的执行序列。

表6.4　重新排序后的优先顺序矩阵

j \ i	t_1	t_7	t_5	t_9	t_3	t_{10}	t_2	t_8	t_4	t_6
t_1	-									
t_7	+	-								
t_5	+	+	-							
t_9	+			-						
t_3	+			+	-					
t_{10}		+	+		+	-				
t_2					+		-			
t_8			+	+			+	-		
t_4							+	+	-	
t_6								+	+	-

表6.5所示为另一个任务的优先顺序的例子，对应的原始优先顺序矩阵如表6.6所示。同样，重新排序后的优先顺序矩阵如表6.7所示，表中包含有三个独立的区域：A、B 和 C。每个区域中的所有任务与其他区域中的任务都不存在先后关系，因此这三个区域可以同时、独立地进行，这样可以提高任务执行效率。

表6.5　另一个任务的优先顺序

任　　务	在此之前要完成的任务
t_1	None
t_2	t_6、t_9
t_3	t_4、t_8
t_4	t_8
t_5	t_7、t_{10}
t_6	t_2、t_9
t_7	t_1
t_8	t_4
t_9	None
t_{10}	t_1、t_5、t_7

表 6.6　另一个任务的原始优先顺序矩阵

j \ i	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}
t_1	–									
t_2		–				+			+	
t_3			–	+				+		
t_4				–				+		
t_5					–		+			+
t_6		+				–			+	
t_7	+						–			
t_8				+				–		
t_9									–	
t_{10}	+				+		+			–

表 6.7　另一个任务重新排序后的优先顺序矩阵

j \ i	t_1	t_7	t_{10}	t_5	t_4	t_8	t_3	t_9	t_6	t_2
t_1	–									
t_7	+	–								
t_{10}	+	+	–	+						
t_5		+	+	–						
t_4					–	+				
t_8					+	–				
t_3					+	+	–			
t_9								–		
t_6								+	–	+
t_2								+	+	–

在区域 A 中，任务 t_{10} 和 t_5 相互独立，可以同时进行。区域 A 可以按照图 6.9a 所示的执行顺序执行。同样，在区域 B 中，任务 t_4 和 t_8 相互独立，也可以同时进行。区域 B 可以按照图 6.9b 所示的执行顺序执行。

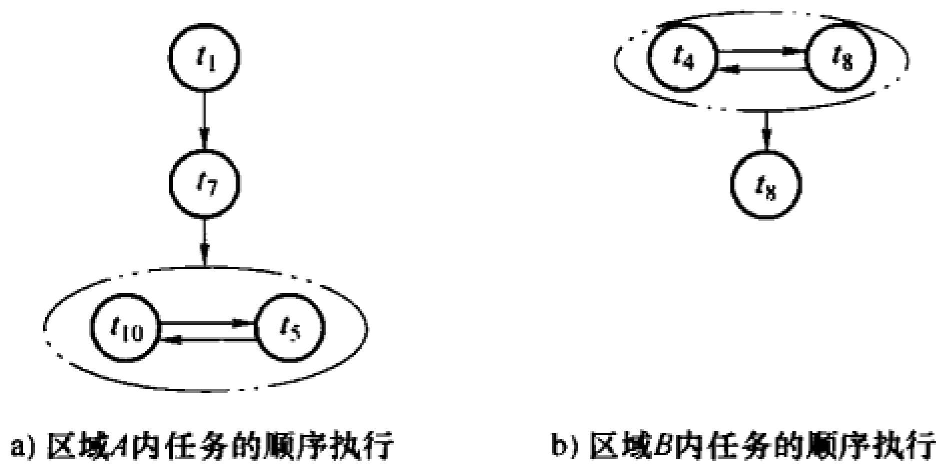


图6.9　任务执行流程

6.3.2　两阶段优化法

1. 两阶段优化的基本方法

如果把具体任务分配给各个部门或单位，每个子系统可能包括一项或多项优化任务，系统优化问题就变成了每个子系统中的决策问题。这类问题就是两阶段优化问题，上层阶段的优化针对整个系统进行，下层阶段的优化是单独进行的子系统的优化。

在大多数优化问题中，系统被划分为 n 个子系统、从属于整个系统的设计变量 d_0 以及从属于每个子系统 $i(=1, 2, \cdots, n)$ 的设计变量 d_i（矢量形式）。d_0 称为调整变量（Adjustment Variable）。整个优化流程如下：

① 阶段1：在子系统层 $i(=1, 2, \cdots, n)$ 中，用调整变量 d_0（矢量形式）的给定值优化设计变量 d_i。

② 阶段2：把设计变量 d_i 的值设定为阶段1所得的优化值，然后优化调整变量 d_0。

③ 阶段3：评估所得解的收敛性。如果所得解被判定为收敛，那么所得设计解就是最优解；如果不收敛，返回到阶段1继续执行。

为了把设计变量划分为系统层设计变量和子系统层设计变量，通常要用到所评价特征和设计变量的关系矩阵[28,29]。表6.8所示为三个目标函数(f_1, f_2, f_3)和12个约束函数(g_1, g_2, $\cdots$, g_{12})与7个设计变量（d_1, d_2, $\cdots$, d_7)之间的关系矩阵。符号“#”表示两者有一定的关系。

表6.9所示为重新整理后的关系矩阵。设计变量被分为三组，然后在每个组内执行两阶段优化。对于子系统1，用目标函数 f_3，约束函数 g_1、g_2、g_6、g_{11}、g_{12} 优化设计变量 d_1 和 d_2；对于子系统2，用目标函数 f_1 和 f_2，约束函数 g_3、g_4、g_5、g_7、g_8、g_9、g_{10} 优化设计变量 d_3、d_4、d_5 和 d_6；对于最高层的系统优化，用目标函数 f_2 和 f_3 以及相关的约束函数优化设计变量 d_7。

表 6.8　三个目标函数（f_1，f_2，f_3）和 12 个约束函数（g_1，g_2，…，g_{12}）与 7 个设计变量（d_1，d_2，…，d_7）之间的关系矩阵

i \ j	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
f_1			#	#	#		
f_2			#	#		#	#
f_3	#	#					#
g_1	#						
g_2	#	#					
g_3			#	#	#		
g_4			#	#	#	#	
g_5					#		
g_6	#	#					
g_7			#				
g_8				#			
g_9			#	#	#	#	#
g_{10}							#
g_{11}	#						#
g_{12}		#					

表 6.9　重新整理后的关系矩阵

i \ j	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
f_3	#	#					#
g_1	#						
g_2	#	#					
g_6	#	#					
g_{11}	#						#
g_{12}		#					
f_1			#	#	#		
f_2			#	#		#	#
g_3			#	#	#		
g_4			#	#	#	#	
g_5					#		
g_7			#				
g_8				#			
g_9			#	#	#	#	#
g_{10}							#

2. 最大化系统目标法

实际中，较大的企业系统通常包括有各种各样的组成部分、部门或专业领域，各个子系统相互协作、共同努力实现某一目标。实际所能实现的目标与目标值之间存在有一定的差距，这类系统的目标是最小化这一差距。应用于此类大型系统的优化程序已被广泛研究[30]，下面介绍一些已提出的方法。

Sobieski 等人提出了“两级集成系统分析法（Bi-Level Integrated System Synthesis Method）”，该方法在系统的每个组成部分执行优化，以实现整个系统的最大化目标[31]。该方法要求在系统层和子系统层交替重复执行优化。

Braun 等人提出了“协同优化方法（Collaborative Optimization Method）”，该方法用于解决航天领域的大规模设计问题，特别是多个不同学科工程部门间的设计问题[32]。例如不同部门独自开展的结构和流体力学分析，由于设计和分析是在不同部门开展的，因此相关数据必须在后续阶段系统地调整和优化。在这种优化方法中，优化包括两个层级：产品设计目标的上层和对各部门建立的模型进行分析的下层。在上层中，最大化或最小化整个系统的目标函数，以实现整个设计目标，同时还要满足下层中包括一般设计变量的约束条件；在下层的优化中，把接近于设计目标的设计变量移动到上层。交替在上层和下层中执行优化流程，这样才能获得产品设计的整体最优解。

在“目标分流法（Analytical Target Cascading，ATC）”中[33]，针对求解问题的具体层级结构，在最高层求解能达到产品设计目标的设计变量值，然后按顺序把这些值设定为下层设计问题的目标值，对下层的设计变量进行优化，获取其目标值。ATC 方法的实施过程如下：

① 步骤1：把整体系统设计问题分解成子问题，再把子问题继续分解成更小的子问题，重复这一过程，直到把所要求解的问题分解成最简单、最基本的问题。然后利用分解后得到的所有子问题和最高层系统，把所要求解的设计问题表示为层级结构。

② 步骤2：定义最高层目标函数的求解目标值。

③ 步骤3：在最高层定义设计变量的值，使目标函数值趋近于优化目标值，然后把这些设定值传递给下一层级。重复这一过程，直至层级结构的最底层。

④ 步骤4：在最底层，把传递下来的设计变量值设定为具体的目标值，然后进行优化；然后把所得到的优化值传递给上一层，用以修改设计变量的优化目标值。重复这一过程，直至层级结构的最高层。

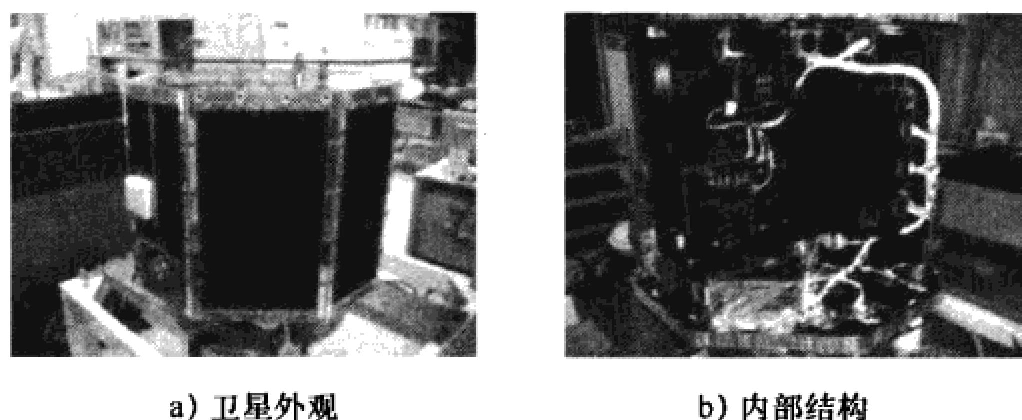
⑤ 步骤5：如果最高层的收敛情况符合要求，所得的设计变量值就可作为设计变量的最优值；如果收敛情况不满意，重复步骤③和④。

3. 多学科设计多优化目标的两阶段优化方法

多学科设计多优化目标的两阶段优化方法（Multidisciplinary Two-stage Mul-

tiobjective Optimization Method）中，在获得每个专业领域的临时设计解之后，把这些解中的设计变量值作为初始设计解，然后在系统层求解整体系统的最优设计解。每个领域优化中的目标函数、约束函数和设计变量都包括在整体系统的多目标优化中。

下面用两阶段优化方法求解微型 LabSat 机载式卫星（如图 6.10 所示）的设计优化问题[34]。首先把优化问题分解为两部分：结构设计优化部分和零件布局设计优化部分，如图 6.11 所示。在结构设计优化部分，评估并优化卫星设计的结构强度和刚度；在零件布局设计优化部分，评估并优化卫星中安装的各种零件的位置。图 6.12 所示为结构设计优化部分用到的结构分析模型。



a) 卫星外观　　　　b) 内部结构

图 6.10　微型 LabSat 机载式卫星

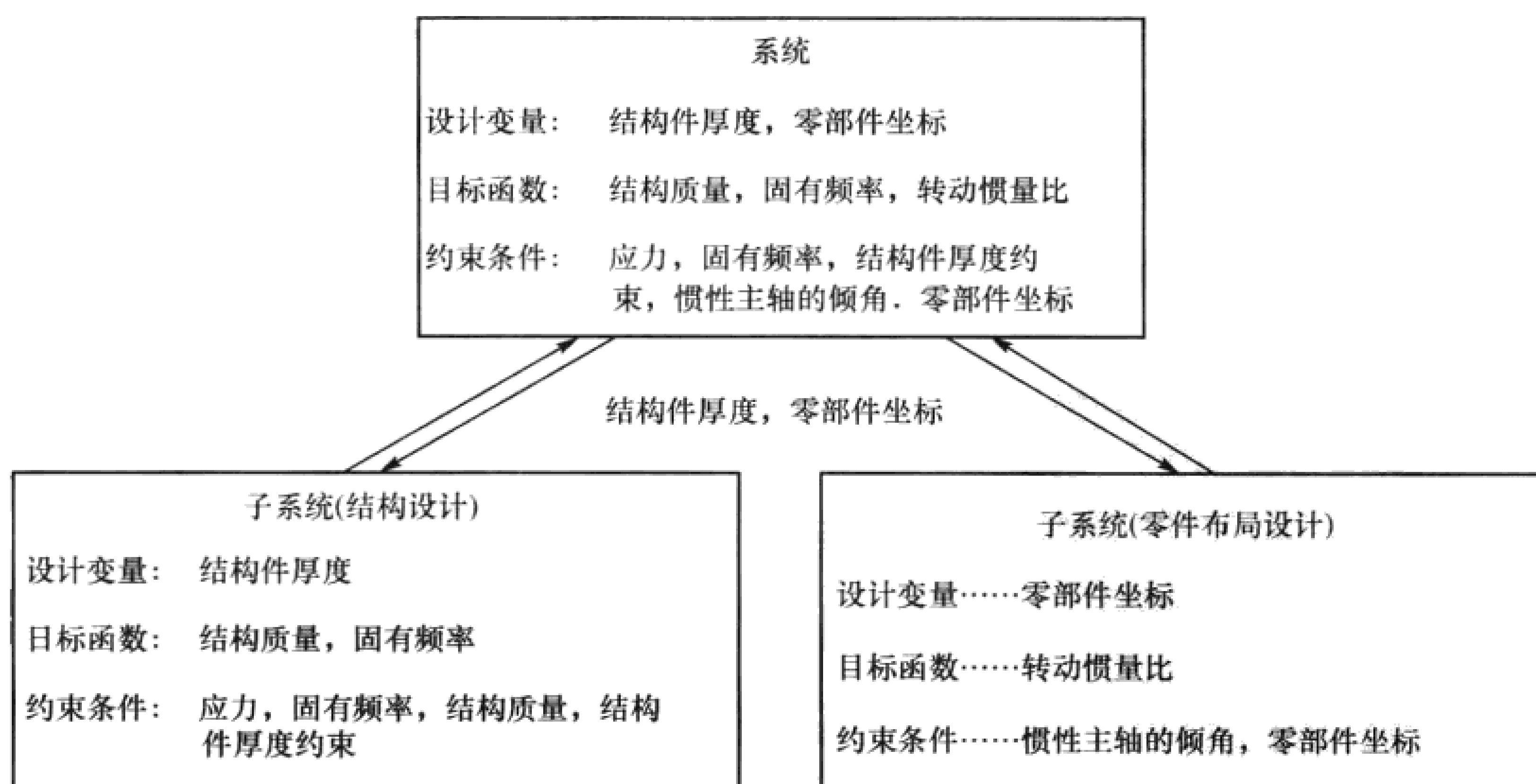


图 6.11　多学科设计中多目标的两阶段优化框架

下面解释零部件布局优化的过程。卫星使用的是旋转控制法，它的行进方向通过围绕 z 轴的旋转来控制。为了保证卫星的行进方向，在设计过程中一定要考虑转动惯量。用 I_{xx}、I_{yy} 和 I_{zz} 分别表示 x、y、z 轴的转动惯量，以下两个转动惯量

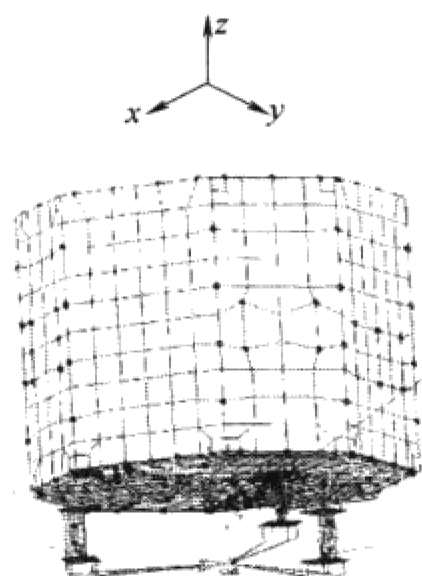


图 6.12　结构设计优化部分用到的结构分析模型

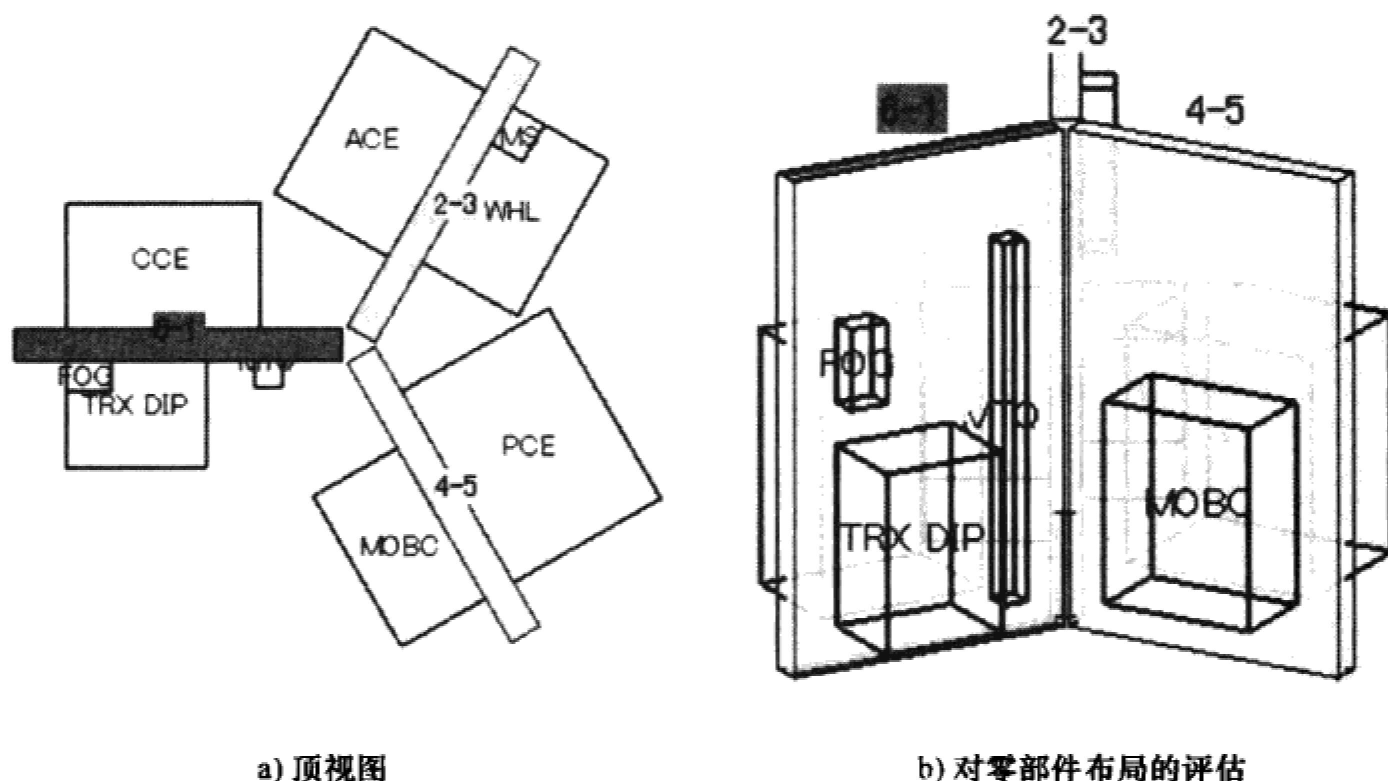
比 S_1和 S_2必须尽可能得大，这样才能保证卫星围绕 z 轴旋转时的稳定性：

$$S_1 = I_{zz}/I_{xx}$$

$$S_2 = I_{zz}/I_{yy}$$

除非以上两个比值都大于某个值，否则就需要在卫星内部进行配重，以实现合适的转动惯量，但这样做会增加卫星的重量，并且会增加火箭的发射包重量。

安装在卫星内部的电路板和零部件的位置会影响转动惯量。零部件的位置产生的影响最大，它的改变会极大地影响转动惯量的值。安装在电路板上的零部件如图 6.13 所示，共包含有 9 个不同的零件，包括电池、计算器、状态控制设备等，这些电路板以 Y 形连接在一起。零部件布局设计决定了 9 个零件的位置，这些位置将使转动惯量达到最大值。在设计时，必须满足的条件有：这些零部件



a) 顶视图　　b) 对零部件布局的评估

图 6.13　安装在电路板上的零部件

一定不能重叠；两相邻零件间的距离必须足够大；某些零部件不能安装在同一电路板上（因为存在电路板的强度、散热等问题）；某些零件最好以一定的朝向安装在某个电路板的某个位置。除此之外，需要满足的约束条件更多。

我们用两阶段优化方法来求解此问题。首先，在阶段 1 中，用 GA（遗传算法）初步确定零部件的位置，这些位置参数属于离散设计变量；然后，把阶段 1 所得的解作为初始设计变量，在阶段 2 中把详细的位置参数表示为连续设计变量，用 SQP 法求解。

图 6.14 所示为转动惯量比的优化解。其中，水平轴线表示转动惯量 S_1 值；垂直轴线表示转动惯量 S_2 的值；符号“o”表示阶段 1 中用 GA 求解得到的帕累托最优解；符号“□”表示阶段 2 中把用 GA 求解得到的解当做初始设计解，用 SQP 法求解得到的帕累托最优解。图中的直线用来对比 GA 和 SQP 法得到的解。从图中可以看出，与用 SQP 求解得到的零件位置相比，每个转动惯量在初始结果（用 GA 求解得到的零部件位置）处急剧增加。很明显，S_1 和 S_2 存在一定的权衡关系。

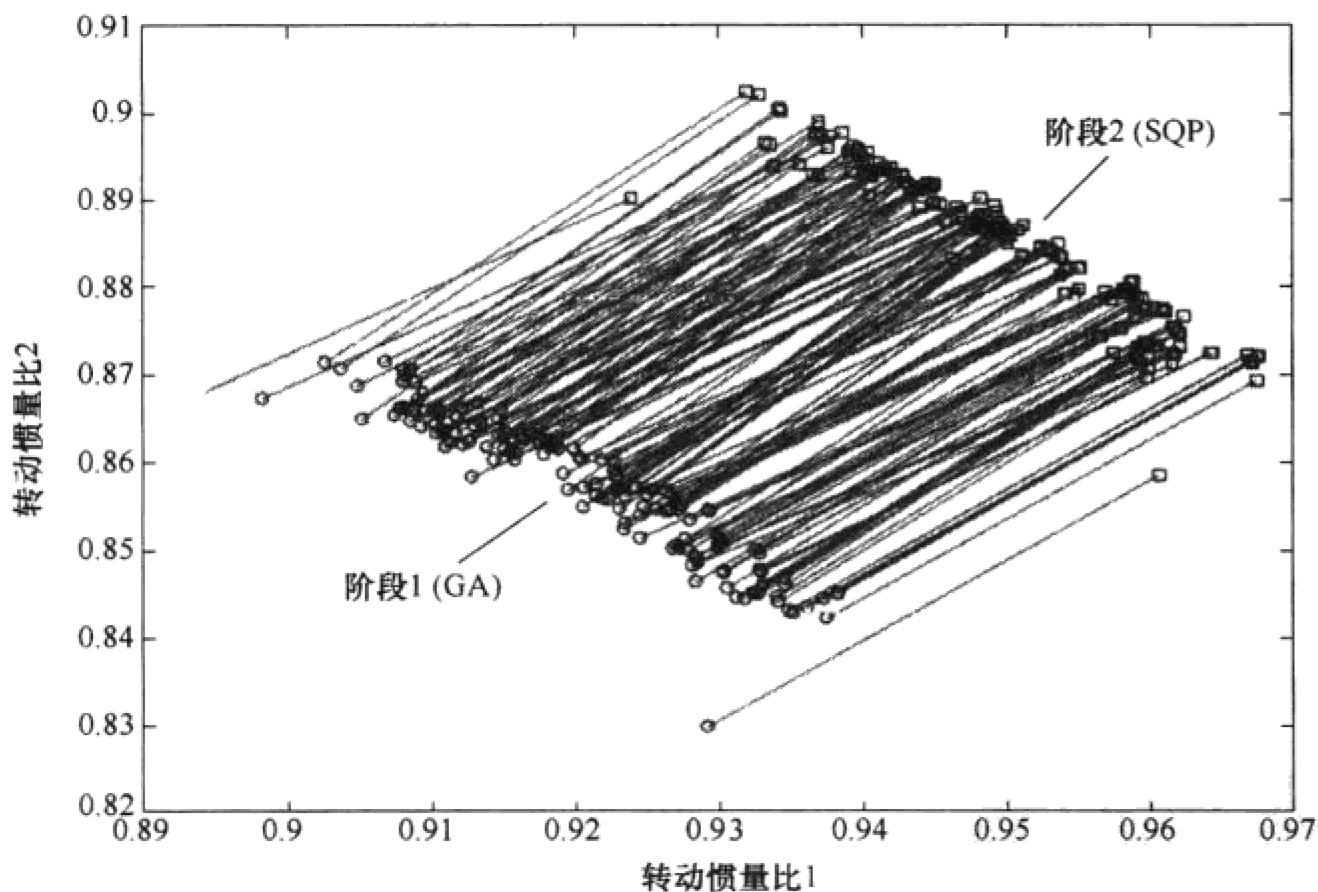


图 6.14　转动惯量比的优化解

结构设计主要关注于卫星的结构强度和刚度。设计变量是四个电路板（也就是上板、下板、安装零部件的电路板和侧板）的厚度。优化目标函数是卫星的固有频率，必须保证它处于最大值，且卫星的结构重量最小。在系统层，整个卫星系统的最优设计是求解一个多目标优化问题，包括两个子系统中用到的所有目标函数。在系统层的优化过程中，要用到 GA 法。

6.4　系统设计优化的策略

6.4.1　机械产品的特征和基本优化策略

通常，实际中的设计优化问题非常复杂，包括有相互冲突的设计特征。在求解此类复杂的优化问题时，了解优化问题中的设计特征，抓住特征间的冲突关系是关键所在。为了完成这一任务，首先要对特征进行简化，就像在第6.2节中所描述的那样，把每个性能特征分解成更简单的特征，或者从原始的特征中抽取简化特征。图6.15所示为基于特征简化的系统设计优化流程[35-37]。

此处用工业机械作为例子解释与机械产品设计相关的设计特征。图6.16所示为一些机械产品示例：机床、工业机器人、冲压机床和注塑机床。在图6.16a、c和d中，工业机械需要加工工件或零件上点A和B中间的部分；在图6.16b中，零件或工具被夹在A点处。经过设计后，机械产品能通过某个部分的移动或运行完成特定的任务。在设计类似的设备时，要评估产品的运行精度和完成特定任务所需的时间，这样才能进一步评估整个机器的能力和效率。

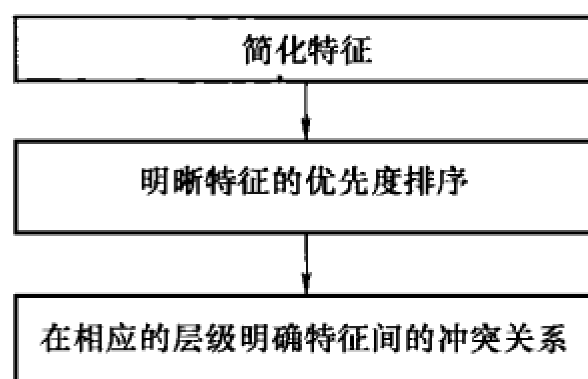


图6.15　基于特征简化的系统设计优化流程

此处需同时评估机器的精度和效率，这两个设计特征都是越高越好。制造过程中的产品制造成本一般要降到最低。在产品优化过程中，需要把精度、效率和产品制造成本考虑成主要的性能特征。产品的每个性能特征通常都非常复杂，因为性能特征通常表现为各种不同零件特征的综合或总和。性能特征的最优解通常是各不相同的，这也表示产品设计特征之间存在有一定的相互关系，是求解全局最优解的主要障碍。

为了弄清楚设计特征间的相互关系，需要仔细分析这些关系，以便明确每个关系中包含的内容、动态特性和数学表达式，同时还要详细考虑优化问题的特殊细节。例如根据具体的工作要求，机器的精度通常用某个具体点的静态位移或动态位移表示。静态刚度k_s用来评估静态位移，动态刚度k_d用来评估动态位移。通常，机械产品被分为两类：仅需要评估静态刚度的产品，同时需要评估静态和动态刚度的产品。由于机械产品是通过各种零件的移动和运行来完成任务的，在静态刚度之外，通常还需要评估并优化动态刚度。此时，就一定要搞清楚静态刚度k_s和动态刚度k_d的关系。

机械产品通常由结构件、机械零件和连接件构成。结构件定义了产品的结构框架，它极大地影响着结构刚度k_M和材料成本C_M；连接件用来连接结构件或机

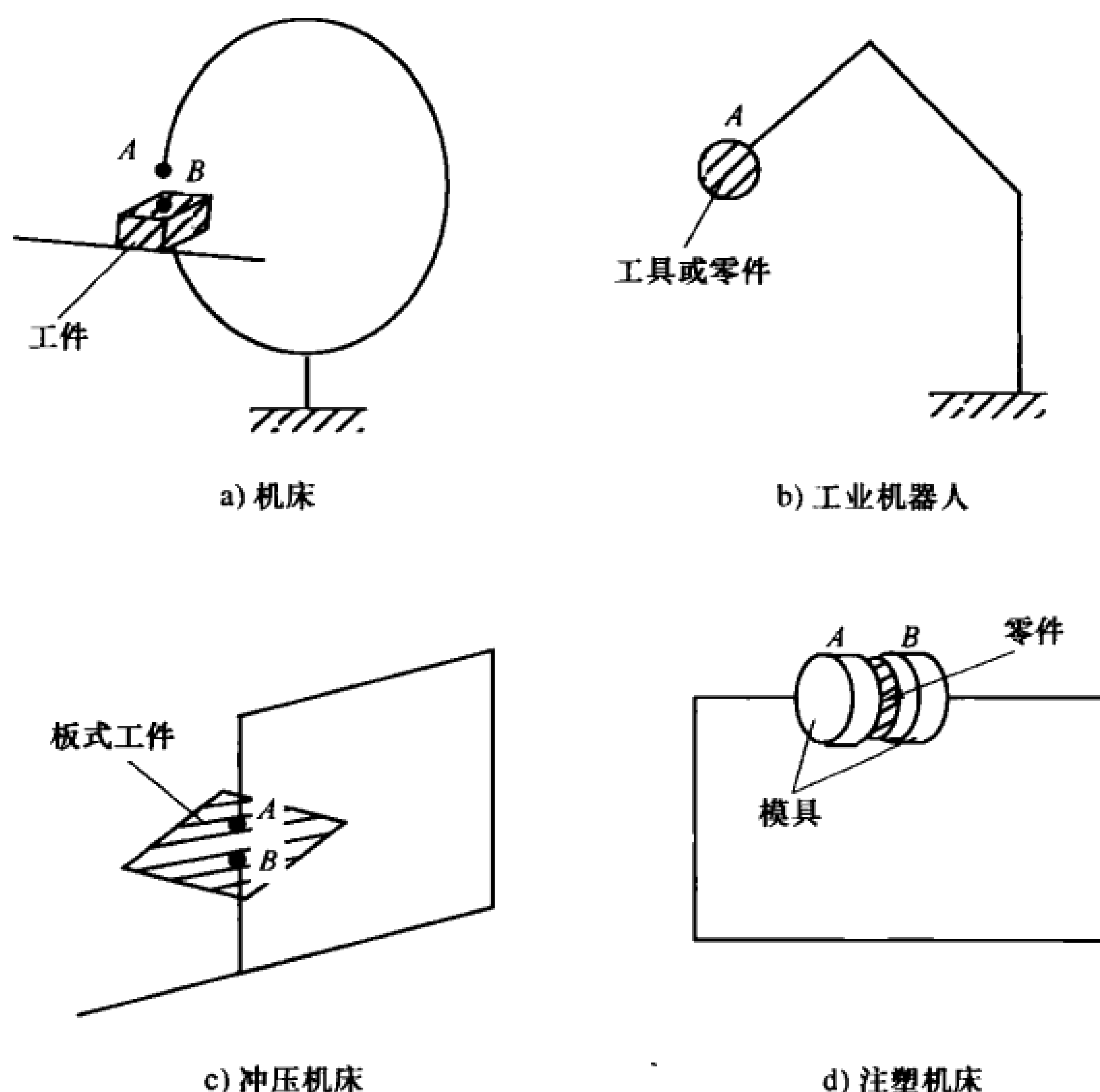


图 6.16　机械产品示例

械零件，它自身有一定的刚度，对影响振动的阻尼效应非常重要。连接表面的加工精度决定了机械产品的精度，连接表面加工成本的提升会极大地影响高精度机械产品的制造成本。

诸如精度和效率之类的产品性能通常非常复杂，一般要将其表示为原始设计特征简化或理想化后的基本特征的组合。例如产品的整体制造成本是各种成本的总和，每个成本都有其自身的特点。同样，产品完全运行时的能源需求也是各种能源需求的总和。通常来说，只对原始形态的设计特征进行分析，是很难搞清楚产品特征间的相互关系的，但如果引入简化概念，将其应用于最重要的设计特征，这一问题就很容易解决。

下面，我们将在产品设计优化的过程中基于特征的简化和理想化，考虑各个特征的优先顺序以及他们之间的冲突关系。

6.4.2　产品设计特征的优先顺序

由于产品设计特征的优先顺序直接影响着执行优化的先后顺序，所以首先要讨论产品设计特征的优先顺序。

如果包含特征 A 和 B 的以下两个条件成立，那么特征 A 优先于特征 B：

① 特征 A 对特征 B 有影响，A 的改进会导致 B 的改进。

② 特征 B 对特征 A 没有明显的影响。

系统优化问题中通常包括两种设计特征：全局特征（Global Characteristics，GC）和局部特征（Local Characteristics，LC）。

结构件刚度就是典型的全局特征。它相对定义结构件尺寸的设计变量呈单调性变化，设计变量增大，它随之增大，反之亦然。结构件刚度通常与结构件重量存在冲突关系，后者也随定义结构件尺寸的设计变量呈单调性变化，设计变量增大，它也随之增大，反之亦然。结构件的刚度和重量都属于全局特征，根据第 6.1.2 节中对于 KKT 条件的论述，对它们进行优化通常能产生单独的局部最优解。

另一方面，结构的连接通常被模拟为具有一定刚度的弹簧和一定阻尼系数的阻尼器的组合形式。对于可用设计变量空间中的动态刚度而言，弹簧刚度和阻尼系数拥有局部最大值，通常把它们归类为局部特征。根据第 6.1.2 节中对于 KKT 条件的论述，当对局部特征进行优化时，可能产生多个局部最优解。

在优化过程中，全局特征比局部特征拥有优先权。当优化问题中只包括全局特征时，就可以对所有特征同时进行优化，但如果存在局部特征，这样求得的局部最优解可能会阻碍全局最优解的产生。在机械产品的设计优化中，特别需要对动态特征进行评估和优化，因为机器通常处于运行状态（机械零件和结构件的运动）。此时，有些特征既是全局特征，又是局部特征，需要对此进行考虑。对于同时包含两种特征的优化问题而言，重要的是在优化过程中理清特征的优先顺序。

根据前面的理论，确定系统优化中设计特征优先顺序的方法如下：

1. 系统优化的通用规则

对于产品系统优化中存在先后顺序的特征而言，存在有以下的排序法则：“从属于整体系统的特征优先于从属于局部的特征。对从属于整体系统的特征的优化要优先执行。”

以上法则的另一种表述为“首先要优化那些具有广泛影响的设计特征，然后再优化那些仅对局部有影响的特征”或“首先优化那些对其他未优化特征有极大影响的特征，然后再优化其他特征”。

2. 系统优化的具体规则

以下是对包括结构件和连接件的结构系统进行优化的规则，其中需要评估结构的静态刚度、动态刚度和应力。

（1）静态刚度和应力分布的先后顺序

图 6.17 所示为某机械产品的结构示意图。外力（F）施加在 A、B 点处，此处需要计算 A 点和 B 点的相对位移 $X(X_A - X_B)$。在点 I 处对结构设计进行刚度分析，可以得出结构在点 I 处的内力（F），如图 6.17b 所示。在定义了点 I 处的具体表面形状之后，就可以得出在此表面的应力分布（σ）。整体结构的设计对静态刚度有

非常大的影响，必须要有详细的设计信息。因此，对静态刚度的优化要优先于对应力分布的优化。这一优先顺序是后面（3）和（4）的基本规则，（3）和（4）是关于结构内力和详细应力分布优化的规则。

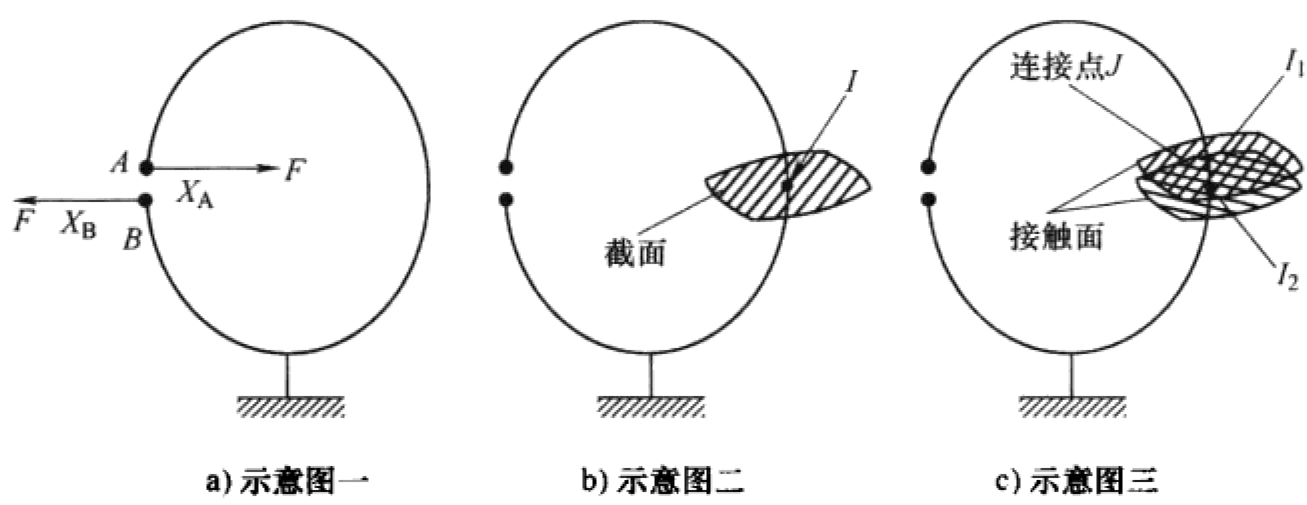


图 6.17　某机械产品的结构示意图

（2）静态刚度和动态刚度的先后顺序

图 6.18 所示为图 6.17a 中点 A 和点 B 之间的频率响应示意图。优化过程中，在点 A 和点 B 之间施加外力 F。为了评估产品运行的精度，需要测量 A、B 两点的相对位移 $X(X_A - X_B)$。

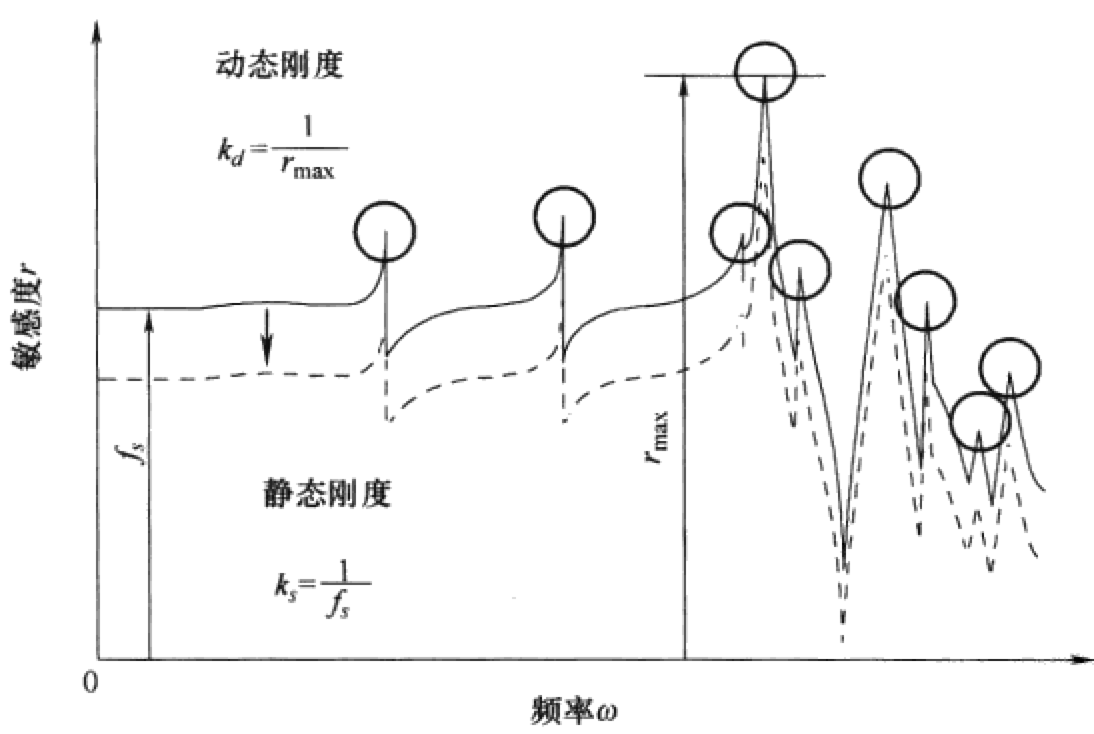


图 6.18　图 6.17a 中点 A 和点 B 之间的频率响应示意图

外力 F 和相对位移 X 的敏感度频率响应由式（6.21）计算：

$$r(\omega) = \frac{X}{F}(\omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{f_m}{1 - (\frac{\omega}{\omega_m})^2 + 2j(\frac{\omega}{\omega_m})\zeta_m} \right] \tag{6.21}$$

式中，ω 为频率；ω_m、f_m、ζ_m分别为产品在第 m 个固有模态下的固有频率、

模态柔度和阻尼比；j 为虚数单位。静态柔度 f_s 的倒数即为静态刚度 k_s，整体频率范围内最大敏感值 r_{max} 的倒数即为动态刚度 k_d。

当公式（6.21）中的频率 ω 为0时，静态柔度 f_s 和模态柔度 f_m 有以下关系[38]：

$$f_s = \sum_{m=1}^{\infty} f_m \tag{6.22}$$

f_s 和 f_m 都为正值。模态柔度 $f_m(m=1,2,\cdots,\infty)$ 表示静态柔度在每个固有模态的分布情况。公式（6.22）中静态柔度 f_s 的最小值相当于最大静态刚度值减去固有模态的最大柔度值。

公式（6.21）分母中的 $j(\omega/\omega_m)\zeta_m$ 仅在接近于所有固有频率 ω_m 时，才对计算结果有影响。因此，可以在不考虑阻尼效应的情况下确定频率响应相对于整体频率范围的曲线图。

如图6.18中的虚线所示，静态柔度的降低会使整体频率范围的敏感度降低，并使每个固有模态的固有频率变大。

对相关特征的检查显示，增加静态刚度 k_s 能够提升结构的动态刚度 k_d。因此，要在优化动态刚度之前对静态刚度进行优化。

（3）结构件刚度和连接刚度的先后顺序

图6.17c中的结构模型类似于图6.17b，但结构件都通过一个连接点 J 连接起来。在评估结构件刚度 k_M 时，通常不需要关注结构件的具体形态；但在评估结构连接刚度 k_J 时，则需要详细的连接表面形状。

产品结构件的尺寸决定了产品的整体外观，但连接点的位置很少会影响产品外观。结构件的尺寸显然会影响到产品运行时结构件之间的作用力。虽然连接设计变量基本上不会影响到这些内力，但它们却改变了连接面上的应力分布。对结构件刚度的优化应该在连接刚度的优化之前进行。

（4）结构连接刚度和连接阻尼系数的先后顺序

结构连接刚度极大地影响着结构的静态刚度 k_s，同时也影响着诸如图6.18中所示敏感度频率响应的范围。另外，每个连接处的阻尼系数影响着固有模态附近的敏感度频率响应（图中小圆圈内的区域），要确定每个固有模态的阻尼系数 ζ_m。因此，对结构连接刚度的优化要先于对连接阻尼系数的优化。

连接处的阻尼效应更强一些，其强度取决于连接件的形态和连接条件。另外，每个固有模态处的阻尼效应也会通过完全不同的方式变得更强。因此，每个连接处都有不同的模态和应力分布。在对包括动态特征的设计进行优化时，这些特殊情况使所得结果中有很多的局部最优解。

6.4.3 层级优化

（在其他特征之前进行优化的）简化特征之间的优先顺序可以通过第6.4.2节中的方法确定，这些顺序决定了优化流程中的层级结构。当进行优化的性能特

征为动态刚度 k_d 时，可以把该特征分解为三个简化特征：结构件刚度 k_M、连接刚度 k_J 和阻尼系数 ζ_m。结构件刚度 k_M 的值与 k_J 和 ζ_m 无关，同样，k_J 的值和 ζ_m 无关。k_M 的值并不影响对 k_J 和 ζ_m 的评估，k_J 的值也不影响对 ζ_m 的评估。也就是说，结构件刚度的增加会增大横截面的宽度，进而会增大连接位置的连接面区域，提升连接的刚度。

阻尼效应在机械产品中非常重要。随着结构件刚度的提升，连接对整体结构设计的影响会更大，每个固有模态的阻尼比也会随之增大。此时，如果 k_M 为最大值，通常会导致 k_J 和 ζ_m 也出现最大值。

为了使 k_d 拥有最大值，需要通过多步骤的决策过程，并按照一定顺序来处理这三个评估因子 k_M、k_J 和 ζ_m。

6.4.4　设计特征之间的冲突关系

至此，我们已在上面介绍的优先排序法则的基础上构建出了基本的层级优化流程。层级优化问题中的所有特征通常都会与普通优化问题中的简化特征之间存在一定的冲突关系，这些冲突特征包含在优化流程的层级化过程中。需要把存在冲突关系的特征放在不同的次级优化组（Sub-Optimization Group）中考虑。

例如结构件刚度的最大化与结构件重量的最小化之间就存在冲突关系。连接刚度的最大化与连接表面加工成本的最小化之间也存在冲突。需要把存在冲突关系的特征划分为次级优化问题，当做多目标优化问题来求解。

6.4.5　层级优化的流程

基于前文内容，层级优化方法有以下特征：

① 层级优化流程要按照前面建立的简化特征的优先顺序进行。

② 由于每一层级的优化过程中都存在有相互冲突的设计特征，需要在每一层级利用多目标优化方法来依次对问题进行求解。每个多目标优化问题都是一个次级优化问题（Sub-Optimization Proble，SOP）。

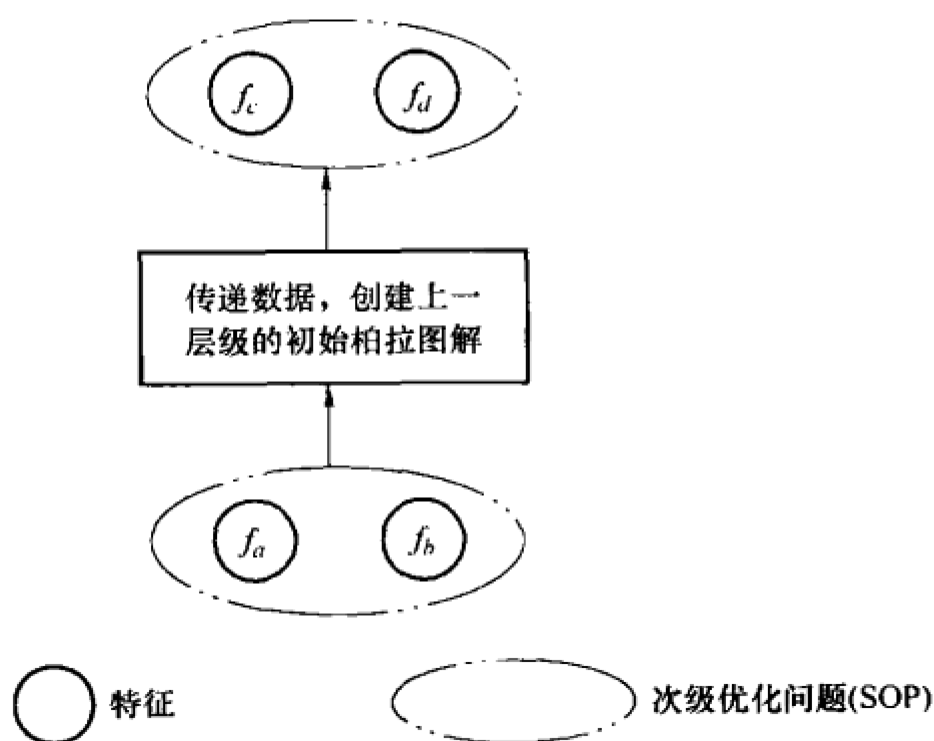


图6.19　将帕累托最优解传递到上一层级

优化流程从最底层开始，首先对最简单的特征进行优化，然后将所得结果以帕累托最优解的形式传递到上一层级，如图6.19所示。通过这样的方法，把SOP所得的帕累托最优解作为上一层级SOP的输入变量。在帕累托最优解集

中，离散点处的设计解可用作上一层优化的输入变量。对每个层级进行优化，累次利用所得帕累托最优解，为所有 SOP 求解其帕累托最优解，最后用其求解最顶层的帕累托最优解。

产品设计师可以从最顶层的帕累托最优解集中的一定量的备选设计中选择最佳设计解，这样就可以从多个方面制订设计决策。在需要确定产品设计需求时，要考虑产品的最终使用环境，这样才可以从大量的帕累托最优解中选出最佳设计方案。

设定适当的设计变量初始值，有利于层级优化策略的步进式执行，也有利于获得有效的最优解。

6.4.6　产品优化的流程

下面我们用一个例子解释实际中的产品优化流程。图 6.20 所示为一个铣床的框架模型——模型 A，它由结构件和连接组成。优化过程中，需要考虑的性能特征包括切割点处的静态、动态刚度以及铣床的制造成本。优化的目标函数是使得最大敏感度值 r_{max} 和机床的制造成本 C_T 降到最低。最大敏感度值 r_{max} 可分解为两个特征：静态柔度 f_s 和阻尼比 ζ。制造成本 C_T 可分解为结构件的材料成本 C_M 和连接成本 C_J。

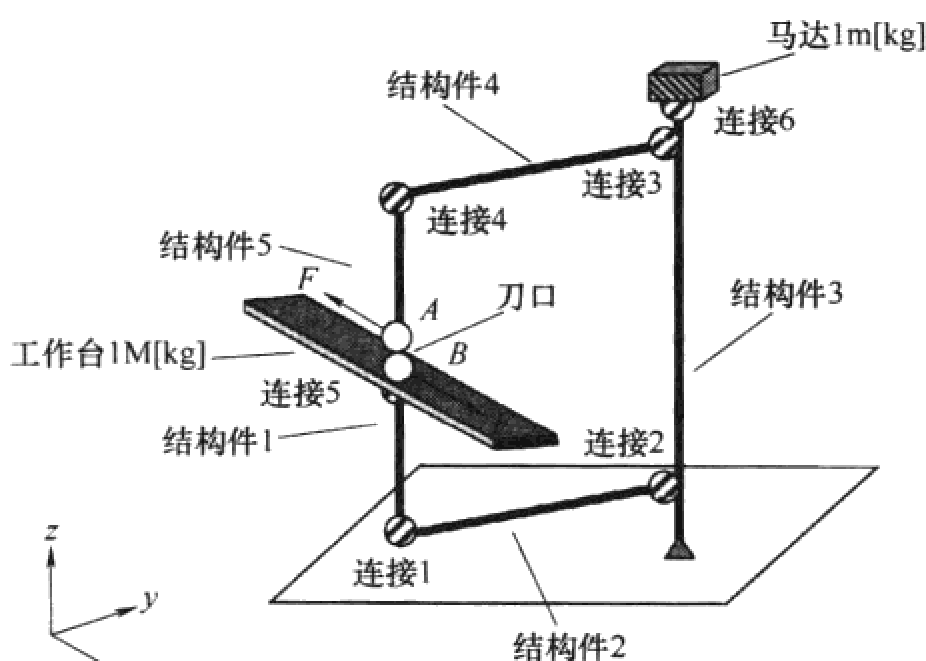


图 6.20　一个铣床的框架模型（模型 A）

分层多目标优化程序如图 6.21 所示，优化的执行过程如下：

① 步骤 1：利用图 6.22 所示的简化模型 B 进行优化，所求为多目标优化问题。由于结构件刚度 k_M 在所有特征中拥有最高优先权，同时 W_S 与 k_M 存在明显的冲突关系，所以先对静力循环下结构件的静态刚度 k_M 和总体结构重量 W_S 进行优化。整个过程在位于图 6.21 的最低层的 SOP3 中进行。

由于点 A 和 B 之间部分静态刚度的求解只涉及图 6.22 所示的静力循环的结构件和连接点，因此可以移除模型 A 中的其他结构件、零件和连接点，这样可以简化优化模型。由于结构件刚度的优化比结构连接刚度的优化具有更高的优先权，可以把结构模型中的所有连接都当做刚性连接处理。设计变量 d_i 是每个结构件的横截面尺寸。此时，可以求得横截面尺寸的帕累托最优解。

② 步骤 2：在图 6.21 所示的 SOP2 中，多目标优化问题是求解静态柔度 f_s

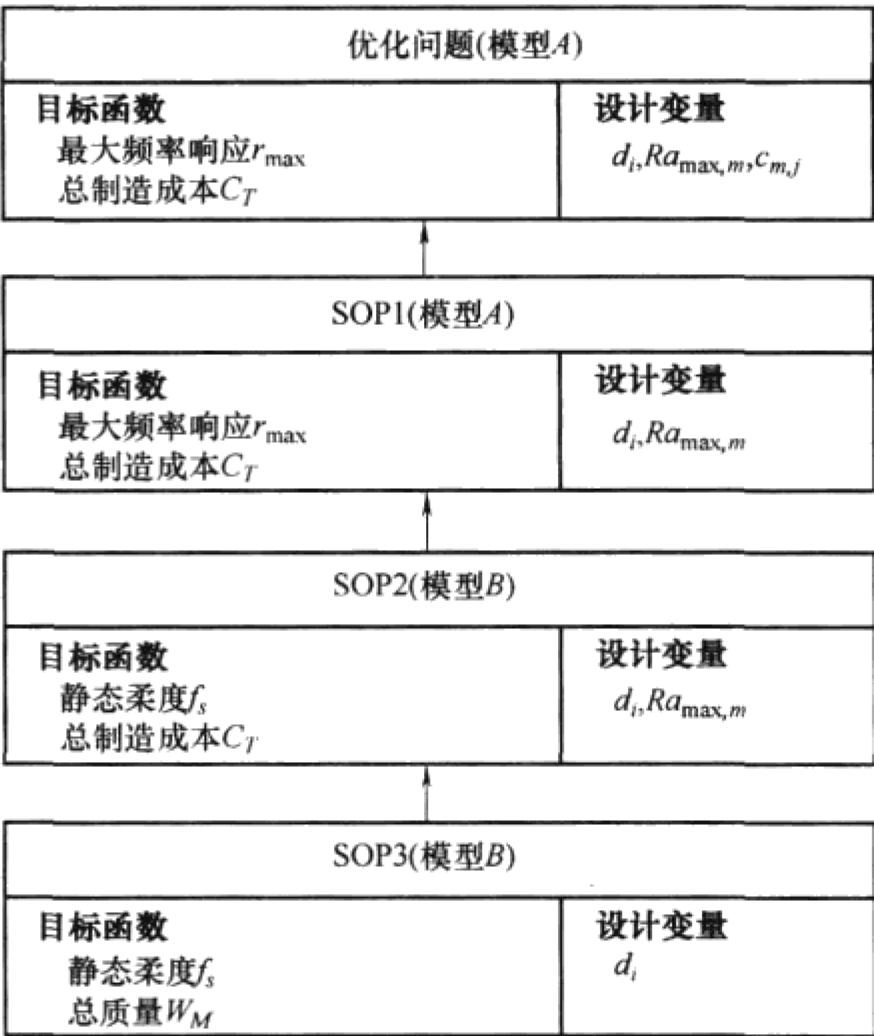


图 6.21　分层多目标优化程序

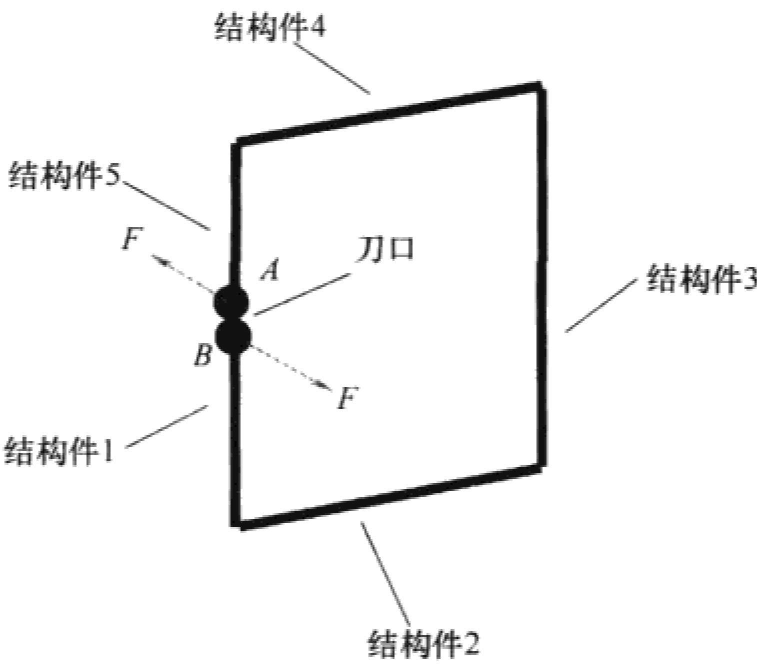


图 6.22　静力循环的结构模型（模型 B）

（静态刚度 k_s的倒数）和所有静力循环下结构件的总制造成本 C_T，即材料成本 C_M和连接的成本 C_J 之和。

现在就可以把模型 B 中的所有连接点都当做柔性连接处理，可以将其模拟为弹簧，设计变量包括连接表面的最大粗糙度值 Ra_{max}。把步骤 1 中所得的截面尺寸用作此次优化的初始设计变量。在优化过程中，表面粗糙度值 Ra_{max}和每单元连接

表面的加工成本 c_u之间的关系如图 6.23 所示。加工成本的计算要考虑三种加工方式：铣、磨和精加工。连接刚度可以根据表面粗糙度和连接面区域计算，材料成本 C_M可通过每单元重量的材料成本乘以结构重量来计算。

③ 步骤 3：在图 6.21 所示的 SOP1 中，通过求解关于最大敏感度 r_{max}和总体制造成本 C_T的多目标优化问题，求出帕累托最优解集。所用的详细结构模型如图 6.20 所示，此处要考虑静力循环之外的结构件、机械零件和连接点等。在此步骤中，把步骤 2 得到的截面和弹簧刚度的优化结果用作初始设计变量，把每个固有模态下的阻尼比 τ 设定为常数。

④ 步骤 4：在图 6.21 的最高层，把步骤 3 所得的截面尺寸和弹簧刚度，还有连接的阻尼系数用作初始设计变量，求解关于最大敏感度 r_{max}和总体制造成本 C_T的多目标优化问题，并最终求解出关于最大敏感度值 r_{max}和总体制造成本 C_T的帕累托最优解集。

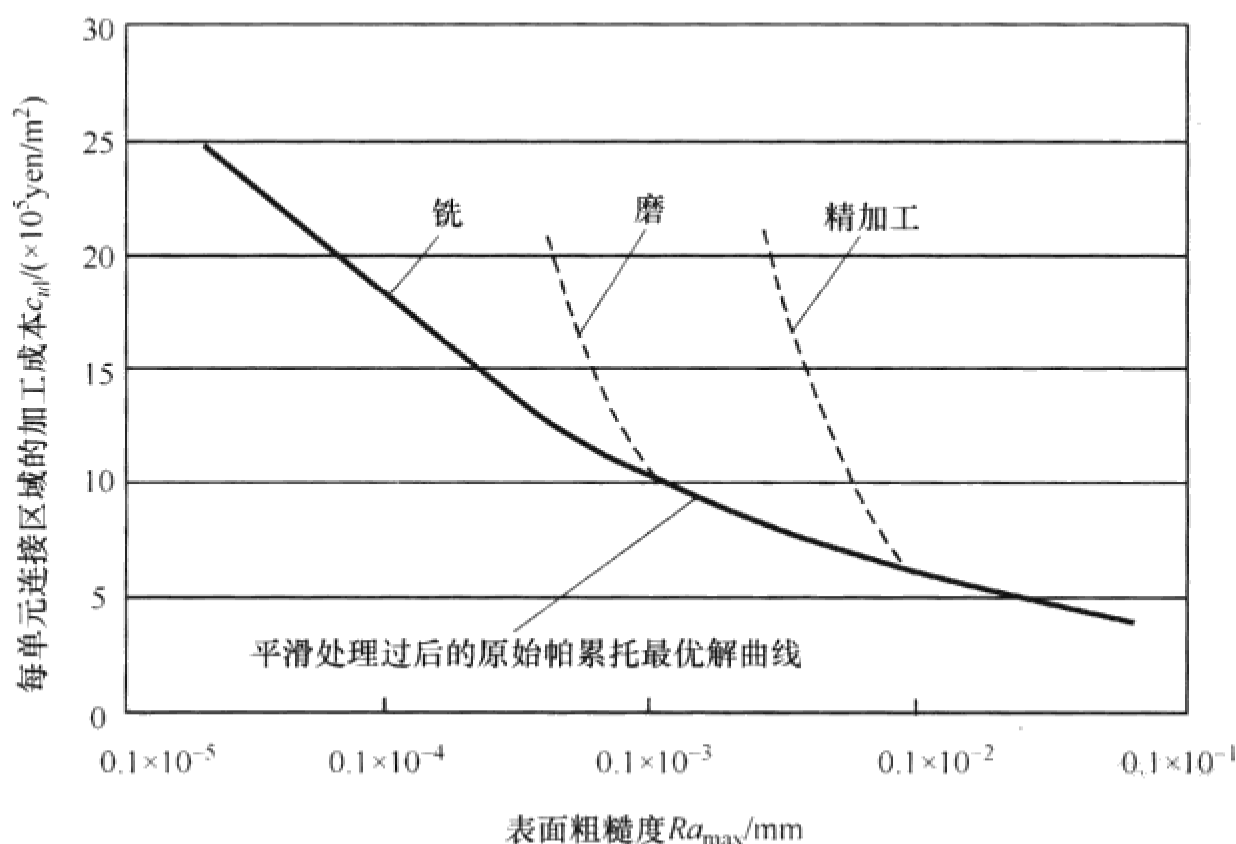


图 6.23　表面粗糙度 Ra_{max}和每单元连接表面的加工成本 c_u 之间的关系

图 6.24 所示为步骤 1 的优化结果，其中的曲线是关于静态刚度 k_M和静力循环下结构件的总体重量 W_S的帕累托最优解集曲线。图 6.25 所示为步骤 2 的优化结果，其中的曲线是关于静态柔度 f_s和静力循环下结构件和连接的总体制造成本 C_T的帕累托最优解集曲线。图 6.26 所示为步骤 3 的优化结果，其中的曲线是关于最大敏感度 r_{max}和完整结构模型的总体制造成本 C_T的帕累托最优解集曲线，其中每个固有模态下的阻尼比为常数。图 6.27 所示为步骤 4 的结果，图中的曲线是关于最大敏感度 r_{max}和总体制造成本 C_T的帕累托最优解集曲线，其中的设计变量包括每个连接处的阻尼系数。

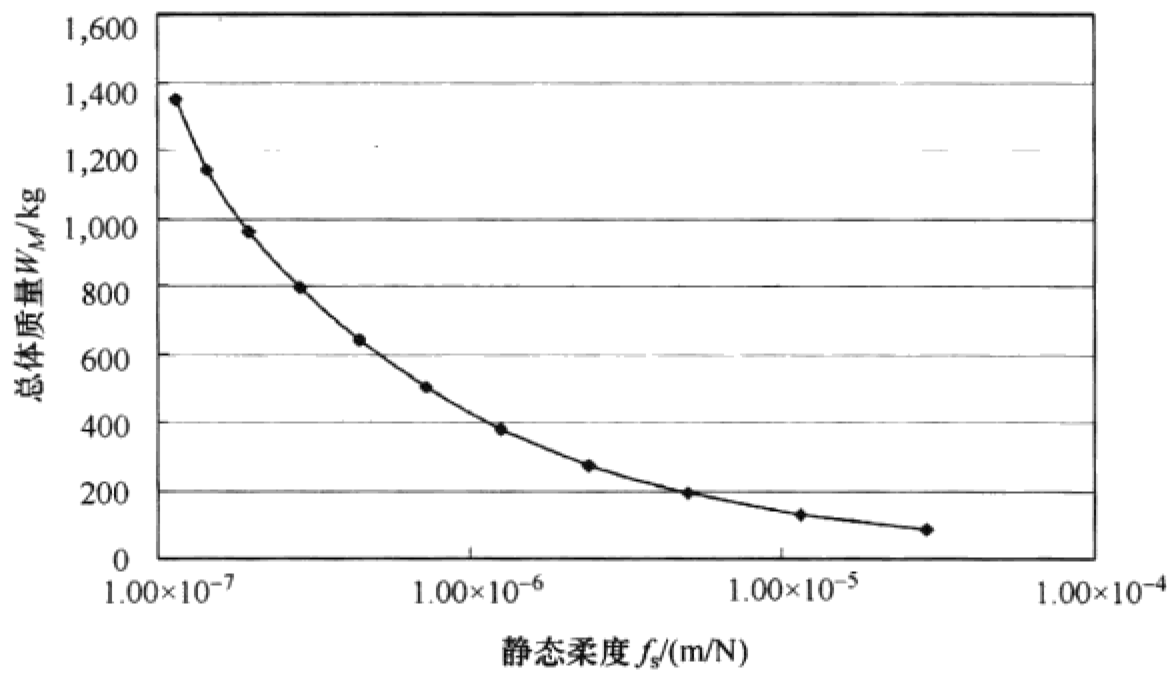


图 6.24　步骤 1 的优化结果

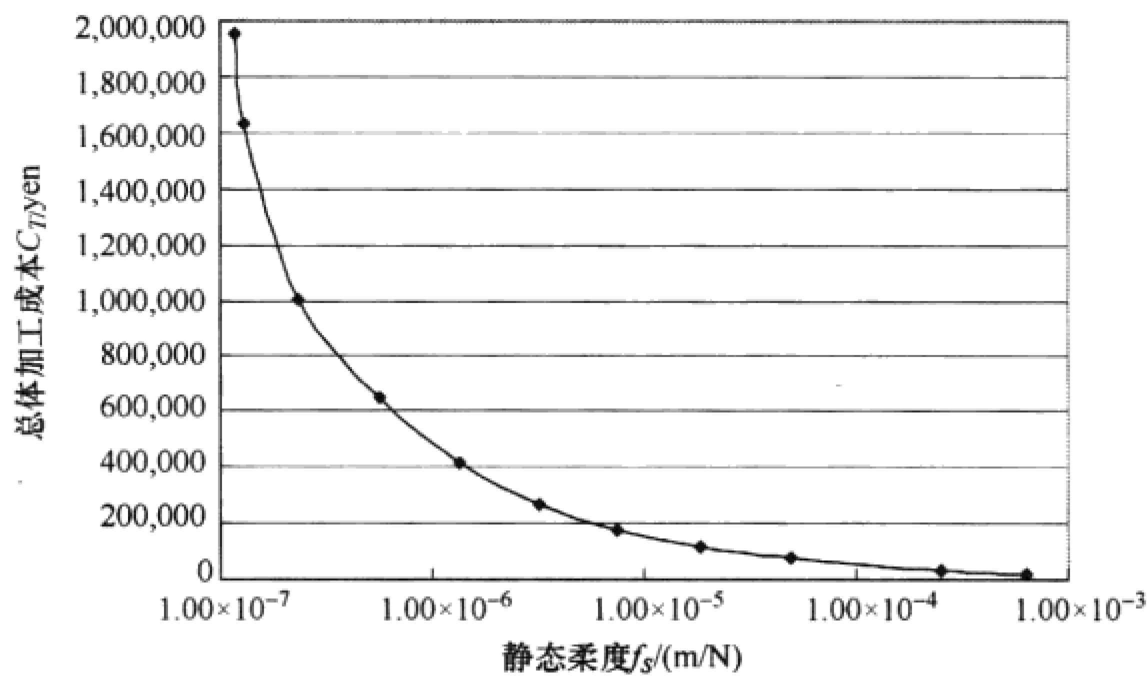


图 6.25　步骤 2 的优化结果

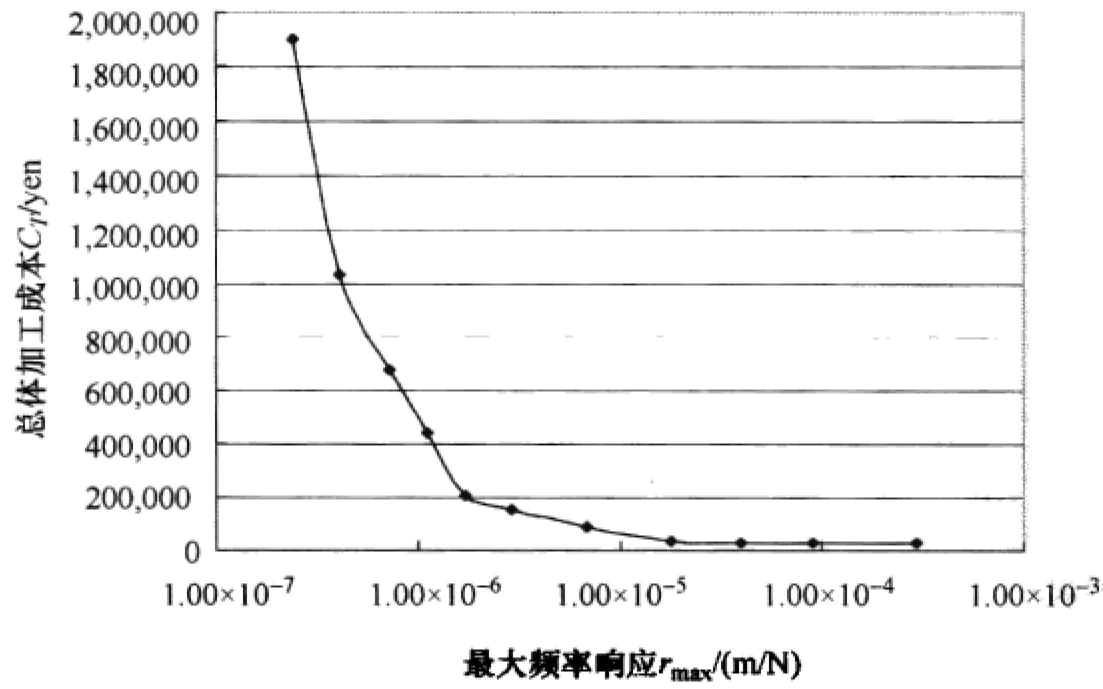


图 6.26　步骤 3 的优化结果

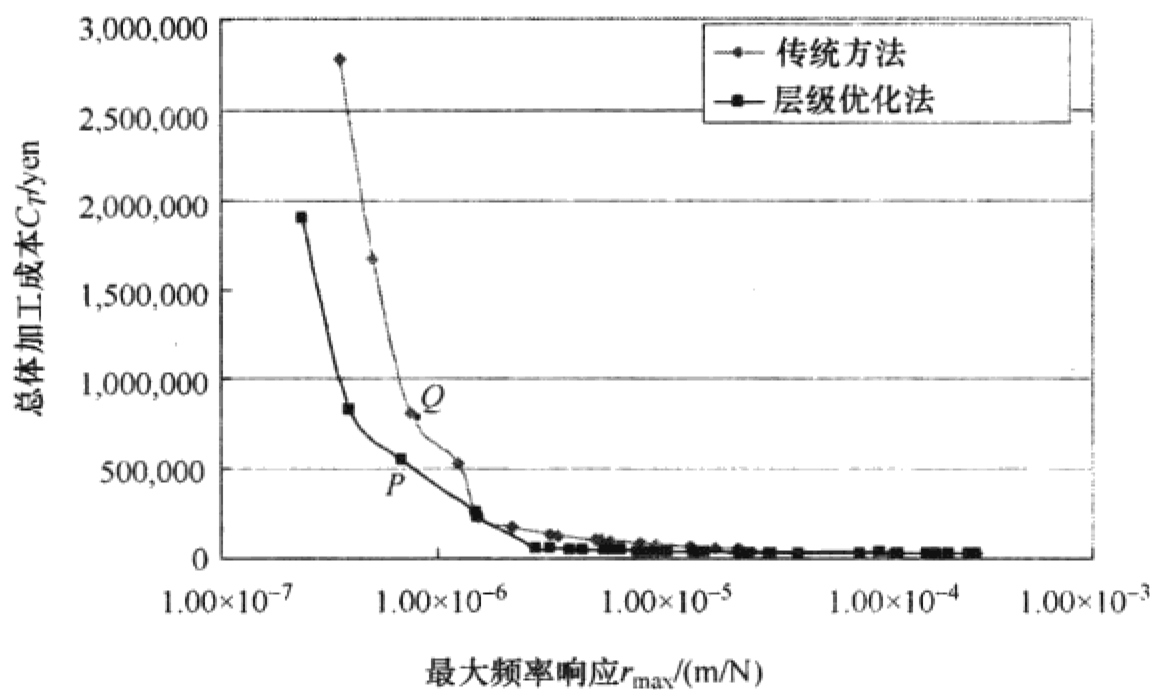


图 6.27　步骤 4 的优化结果

为了验证所提出方法的有效性，将以上优化结果与通过传统优化方法所得的结果进行比较。传统的优化方法直接用可行方向法（Feasible Direction Method）对产品的性能特征（步骤 4 中的目标函数）进行优化，没有使用层级优化流程。用传统优化方法求出的优化结果在图 6.27 中用“◆”符号标出，用层级优化方法求出的优化结果用“■”标出。图中的细线表示帕累托最优解，是传统方法所得最优解的突破。通过对比表明，使用作者所提出的方法能够得到更好、更可靠的优化解。

在传统的优化流程中，都是从比较大的初始可用解区域中寻求最优解。但如果可用解区域存在偏差，由于受区域中设计解的影响，执行搜索过程可能会妨碍有用解的收敛，甚至会阻止其收敛。在上述例子中，随着层级优化过程的推进，机械产品从最简单的初始模型逐步得到细化，如图 6.28 所示。为了简化所有优化问题，只模拟需要进行评估的特征。这种方法的主要特征是：较好的初始设计解会成为下一阶段优化的基础，整个有序的优化过程持续收敛到有效优化解。

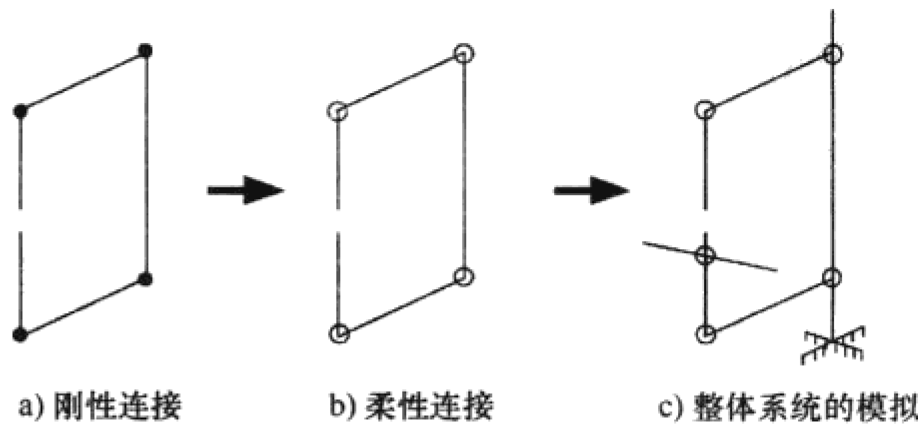


图 6.28　层级优化流程中的模型变化

6.4.7 关于系统优化的讨论

第 6.4 节中所介绍的系统优化流程的优点包括：

① 对于复杂系统设计优化问题，该方法能提高获得全局最优解的概率。

② 对所得最优解的评估更加容易，能从系统层面更容易地抓住最优解的特征。

大部分机械产品都由结构件、机械零件和连接构成。为了寻求有效的优化解，需要对动态刚度进行评估和优化。以上介绍的优化方法可用于更广泛的机械产品的设计优化。

另外，基于特征优化概念的层级优化方法的基本框架可用于更广泛的优化问题。如果设计特征可进行有效简化，那么对简化特征的优化总是可以在对原始特征进行优化之前进行。实际上，有效的层级优化流程会根据原始特征和其简化特征之间的关系自动执行优化。

6.5 备选设计方案的优选法

为了让产品设计优化的最终结果更具效力，需要尽可能地准备更多的设计备选方案，然后在其中选出最优的方案。目标产品各种各样，通常为以层级方式相互连接的零件、部件和结构件。位于每个特定层级的产品组成元素都需要有少量或更多的备选方案。图 6.29 所示为 HGA 算法示意图。通常来说，包括离散设计变量的产品设计优化非常复杂，如从大范围的方案中选择某个特征的最优方案。分层遗传算法（Hierarchical Genetic Algorithm，HGA）[39] 是最有效的优化方法，它能为此类设计问题提供有效的解。

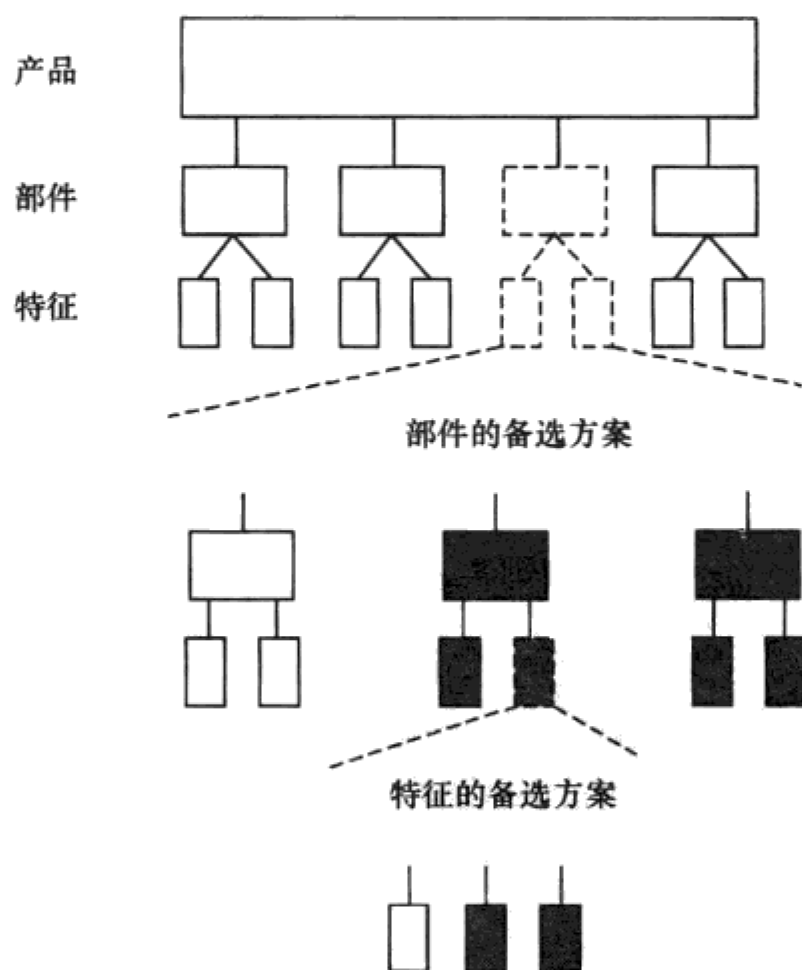


图 6.29　HGA 算法示意图

在传统遗产算法中，通常使用设计变量的一维矢量基因矩阵，但分层遗传算法使用层级化的基因编码。这样，可以在设计变量中同时包括最底层详细设计的备选方案和最高层功能、原理的备选方案。因此，在分层遗传算法所要解决的问题中，决策的过程是分层进行的，这样可以更加容易地对问题进行求解，也可以获得更有效的优化解。

为了说明分层遗传算法的原理，假设有图 6.30 所示的简单机械结构，图中的产品包括两个次级结构 A 和 B，分别有备选方案 A_1、A_2 和 B_1、B_2、B_3，需要为此结构选择设计方案并进行优化。

另外，次级结构 A_2 包括两个部件：a 和 b。部件 a 有 a_1、a_2 和 a_3 三个备选方案；部件 b 有 b_1 和 b_2 两个备选方案。为了便于优化，把上述关系用简单的数字以层级化的形式表示出来，如图 6.31 所示，括号内的数字表示每个次级结构的备选方案的个数。也就是说，如果某个节点在下一层级有 n 个次级结构，次级结构 i 拥有 $h_i(i=1, 2, \cdots, n)$ 个备选方案，那么这种关系就可以表示为 $(h_1, h_2, \cdots, h_n)$。如果第 s 个次级结构有个备选方案，为原始标记加上 "s, t-"。

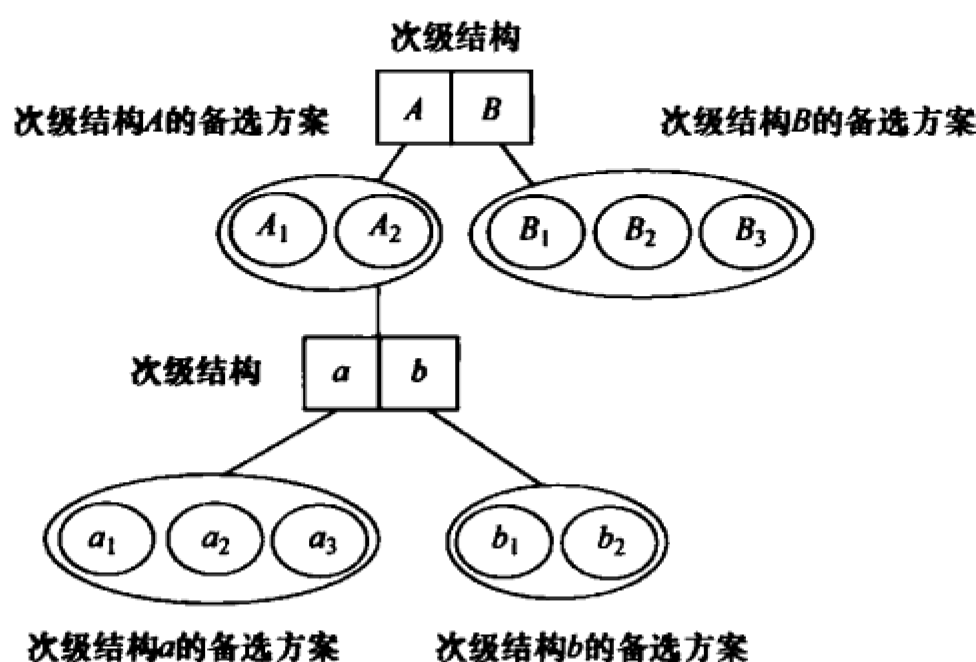


图 6.30　次级结构有备选方案的产品

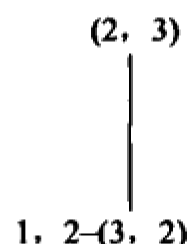


图 6.31　次级结构有备选方案的产品的层级化表示

如果上一层级还包含有次级结构，重复以上过程，并为标记加上额外的表示符号。设计变量用来为次级结构从众多备选方案中选择最佳方案，它相当于 HGA 中的基因。

假设从图 6.30 中层级化表示的备选方案中选出的结果如图 6.32 所示。在最顶层选择了 A 的第二个备选方案 A_2，B 的第一个备选方案 B_1，标记就应该表示为 [2，1]，如图 6.33 所示。中括号内的数字表示每个次级结构从备选方案中选出的设计变量。A_2 选择了 a_3 和 b_1，标记为 [3，1]。为了表示该项属于 A_2，需要在该标记加上前缀 "1，2-"，即 1，2- [3，1]。就是说，如果选择了第 s 个层级结构的第 t 个备选方案，就需要为原始标记 $[g_1, g_2, \cdots, g_n]$ 加上前缀 "s, t-"。如果还存在更高一层的次级结构，重复这一过程，并为标记加上相应的前缀。在层级

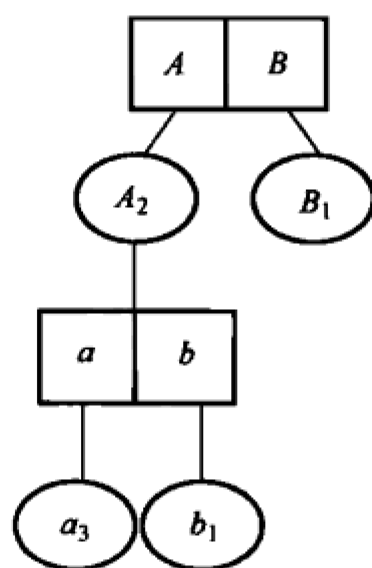


图 6.32　从图 6.30 中层级化表示的备选方案中选出的结果

结构中选出的备选方案的表示形式如图6.33所示。

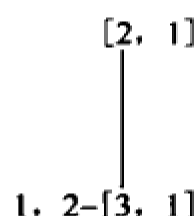


图6.33 在层级结构中选出的备选方案的表示形式

图6.34所示为上一层级结构的交叉操作，次级结构间进行基因交换。此处的交叉是在父代1和父代2上进行的。他们在图中画圈的位置拥有不同的基因。图6.34的右边部分表示基因的交换。当执行这项操作时，属于交换基因的下一层级的基因同时也交换。也就是说，如果子代2是通过交叉产生的，且父代1的下一层级拥有“2”的基因“1，2-[3，1]”，那么子代2包含有基因“1，2-[3，1]”。

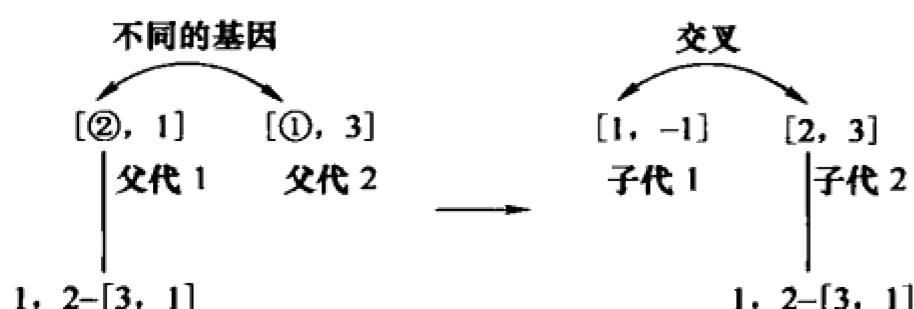


图6.34 交叉操作示例1

与此类似的交叉操作规则不仅可用于最高层基因的操作，也可以应用于低层级上基因的交叉操作。在图6.35所示的例子中，由于较高层级上画圈位置的基因相同，那么需要对较低层级上画圈位置的基因进行交叉操作。首先对层级系统中最高层的基因进行变异操作，然后再按照顺序为较低层级上的基因执行类似的操作。

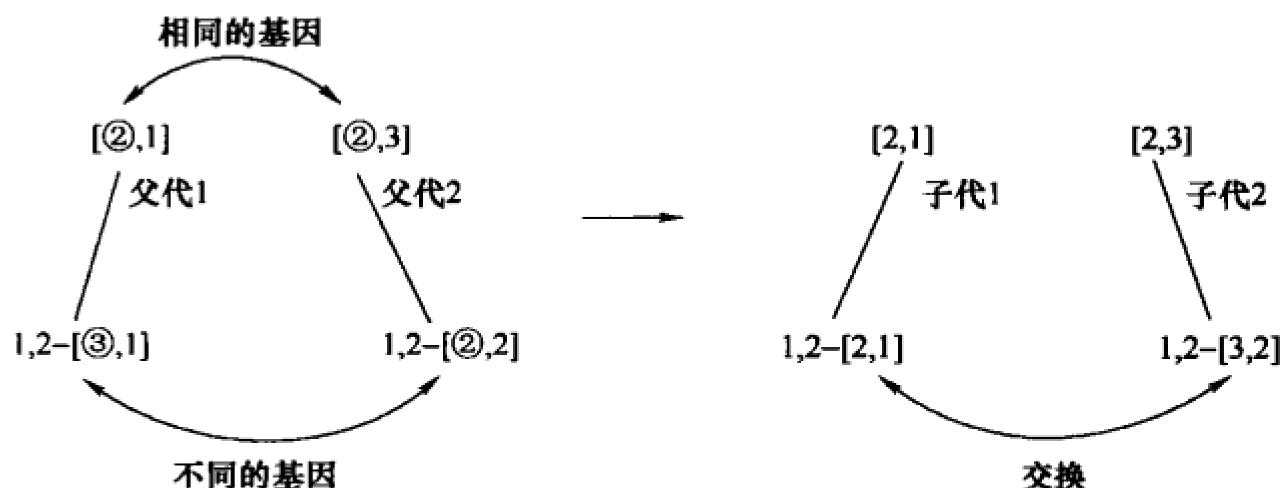


图6.35 交叉操作的示例2

思考题

6.1 阐述对以下问题进行优化时的困难所在：非线性优化问题，多目标问题，离散设计变量问题，大规模优化问题，并探讨可解决这些问题的方法。

6.2 讨论离散设计变量的优化方法——GA 法和分支界限法各自的特征、两者的差异，优点和缺陷。

6.3 分别从非线性优化问题、离散设计变量优化问题和多目标优化问题角度考虑，在尝试寻找机械产品设计的最优解，以保证其拥有高运行精度和运行效率时，实际的困难有哪些？

假设优化问题为：

优化标准：产品重量，静态刚度；

设计变量：三种可选的结构材料 A、B 和 C，根据结构的维度不同，有 N 个设计变量；

约束条件：产品尺度的上下边界。

讨论解决该问题的方法。

6.4 在优化结构设计时，结构刚度和连接刚度有什么不同？

6.5 在优化结构设计时，结构的材料成本和结构连接加工成本有什么不同？

6.6 为什么说基于简化概念的优化程序对求解产品设计最优解时非常有效？

参考文献

1. Johnson RC (1961) Optimum design of mechanical elements. 2nd edn. Wiley, New York
2. Wilde DJ (1978) Globally optimal design. Wiley-Interscience Publication
3. Haug EJ, Arora JS (1979) Applied optimal design. Wiley-Interscience Publication, New York
4. Siddall JN (1982) Optimal engineering design. Marcel Dekker, New York
5. Vanderplaats GN (1984) Numerical optimization techniques for engineering design: with applications. McGraw-Hill, New York
6. Haftka RT, Kamat MP (1985) Elements of structural optimization. Martinus Nijhoff
7. Papalambros PY, Wilde DJ (2000) Principles of optimal design. 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge
8. Arora JS (2004) Introduction to optimum design. 2nd edn. Elsevier
9. Mastinu G, Gobbi M, Miano C (2006) Optimal design of complex mechanical systems, Springer
10. Karush W (1939) Minima of functions of several variables with inequalities as side conditions. M.S. thesis, Department of Mathematics, University of Chicago
11. Kuhn HW, Tucker AW (1951) Nonlinear programming. In: Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, J. Neymmmaan (Ed.), University of California Press, Berkeley, CA:481–492
12. Yoshimura M (2008) System design optimization strategies for machine products. In: The 5th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM5), Korea:1–6

13. Eschenauer H, Koski J, Osyczka A (eds) (1990) Multicriteria design optimization. Springer
14. Papadimitriou CH (1982) Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice-Hall
15. Baker KR (1974) Introduction to sequencing and scheduling. Wiley, New York
16. French S (1982) Sequencing and scheduling: an introduciton to the mathematics of the job-shop. Ellis Horwood
17. Gutkowski W, Bauer J. (eds) (1994) Discrete structural optimization. Springer
18. Hitomi K, Yoshimura M (1986) Operations Scheduling for Work Transportation by Industrial Robots in Automated Manufacturing Systems. Material Flow, 3:131–139
19. Holland J (1975) Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press
20. Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, Optimization and machine learning. Addison Wesley.
21. Yoshimura M, Yoshimura Y, Izui K, Nishiwaki S (2009) Product optimization incorporating discrete design variables based on decomposition of performance characteristics. ASME Journal of mechanical design, Vol.131:031004,1–10
22. Nishigaki J, Nishiwaki S et al. (2001) First order analysis – New CAE tools for automotive body designers. SAE Paper, No.2001-01-0768
23. Yoshimura M, Hamada T, Yura K, Hitomi K (1983) Design optimization of machine-tool structures with respect to dynamic characteristics. Transactions of the ASME, Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design, 105(1):88–96
24. Yoshimura M, Takeuchi Y, Hitomi K (1984) Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity. Transactions of the ASME, Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design, 106(4):531–537
25. Steward DV (1981) The design structure system: a method for managing the design of complex systems. IEEE transactions on engineering management, 28(3):71–74
26. Yoshimura M, Izui K, Fujimi Y (2003) Optimizing the decision making process for large-scale design problems according to criteria interrelationships. International journal of production research, 41(9):1987–2002
27. Kusiak A, Wang J (1993) Decomposition of the design process. Transaction of the ASME journal of mechanical design, 115:687–694
28. Krishnamachari RS, Papalambros PY (1997) Hierarchical decomposition systhesis in optimal systems design. ASME Journal of Mechanical Design, December, 119:448–457
29. Michelena NF, Papalambros PY (1997) A Hypergraph framework for optimal model-based decomposition of design problems. Computational optimization and applications, 8(2):173–196
30. Park GJ (2007) Multidisciplinary design optimization. In: Arora, JS (ed) Optimization of structural and mechanical systems, World Scientific 361–388
31. Sobieszczanski-Sobieski J, Altus TD, Phillips W, Sandusky R (2003) Bilevel integrated system synthesis for concurrent and distributed processing. AIAA Journal, 41(10):1996
32. Braun RD, Moore AA, Kroo IM (1997) Collaborative approach to launch vehicle design. Journal of spacecraft and rockets, 34(4):478
33. Kim HM, Rideout DG, Papalambros PY, Stein JL (2003) Analytical target cascading in automotive vehicle design. Transaction of ASME, journal of mechanical design, 125(3):481
34. Yoshimura M, Murase Y, Yamauchi M, Izui K, Nisiwaki S, Moriya S (2004) A theoretical consideration of organized analysis environment for optimum design solutions. In: Proceedings of International Conference on Cybernetics and Informatics Technologies, Systems and Applications (CITSA2004), Vol.IV:76
35. Yoshimura M, Taniguchi M, Izui K, Nishiwaki S (2006) Hierarchical arrangement of characteristics in product design optimization. ASME journal of mechanical design, 128:701–709
36. Yoshimura M (2007) Global product design optimization strategies based on simplification of product characteristics. In: Conference Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design, ICED'07, August, Paris, France:1–12

37. Yoshimura M, Yoshimura Y, Izui K, Nishiwaki S (2008) Fundamental strategies for system optimization of machine product designs, In: Proceedings of ASME 2008 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2008-49435:1–11
38. Yoshimura M (1987) Design optimization of machine-tool dynamics based on clarification of competitive-cooperative relationships between characteristics. Transactions of the ASME, Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design, 109(1):143–150
39. Yoshimura M, Izui K (2004) Hierarchical parallel processes of genetic algorithms for design optimizations for design optimization of large-scale products. ASME Journal of mechanical design, 126:217–224

第 7 章　决 策 方 法

如何实现更好的产品制造取决于能否制订更好的决策。第 5 章阐述的相关支撑技术已被开发出来并得以实施，这使得相关人员能够在产品制造过程中对各种因素和细节问题进行更加全面、深刻的思考和判断。第 6 章阐述的产品制造优化技术也已被开发出来并得到了改进，这使得优化后的产品能够更好地满足多样化的客户需求，并且能被更高效、更合理地生产出来。以上技术已经综合应用于产品制造各个方面的决策中。本章将介绍获得满意决策结果的基本决策方法，与仅简单地依靠经验和直觉进行决策相比，使用决策支持系统和优化方法能够提高获得更优决策结果的概率。另外，本书介绍的这些方法能够对决策过程以及设计结果进行全面的评估和考查，久而久之就可以形成更加优良的决策结果。

7.1　制订决策的困难及基本规划

7.1.1　决策的困难

在以下几种情况下，决策过程会变得特别困难：

① 有多个备选方案。

② 有多个评估标准或属性。

③ 有不确定因素，比如行情波动或天气变化。

④ 有多个来自不同领域的决策者，且这些决策者必须达成决策的一致。

最后一种情况指的是协同环境下的决策。在这种情况下，某个决策者可能会试图以某种方式最大化自身的影响，忽视其他成员的看法，这会极大地降低决策结果的质量，同时也会带来负协同效应。

7.1.2　促进决策的基本规划

以下规划有助于使决策更为有效且更易实施：

① 随着备选设计方案数量的增加，比较备选方案的困难程度呈几何级数增加。这种增长关系对于那些必须被评估的标准也是成立的。然而针对一个特定的标准或者属性，在两个供选方案之间的比较，也就是配对比较，一般是很容易的，并且能够进行逐一比较。当同时出现多对比较时，可以用系统性的评估来进行比较。

② 定性属性不容易进行比较。为了开展有效评估，必须把定性属性转换成

能用来实施有效决策的定量值。

③ 即使某个解表现出明显的优越性，判断决策结果是否合理仍然存在一定困难，但可以用其他已经获得的解来进行比较，这有益于正确的判断。例如提供一系列可比较的解（如帕累托最优解）而不是单个解，这会使决策更加可靠有效。

④ 使用有视觉吸引力的图表显示优化结果，有助于提高决策效率，也能提升所得解的有效性。

⑤ 由于人通常是设计决策的最后仲裁者，对决策者自身偏好特征的定量表达有助于弄清决策细节。

⑥ 在协同场景中，决策支持系统的构建能起很大作用，它可以引导理性的妥协，并激发出潜在的协同效应。

⑦ 追踪决策流程，这样能找出妨碍获得满意决策的原因或者固有障碍，所找出的这些信息可以用来改进决策支持系统。

7.2　制订决策的基本原则

当从大量的备选方案中选择一个解决方案时，对方案进行模拟验证，所得的结果是非常有用的，即使这些信息在作出最终决策的时候不能直接使用。下面说明执行决策过程的最基本方法。

7.2.1　多因子评价的优选法

假设有 n 个备选方案，表示为 $d_i(i=1, 2, \cdots, n)$。每个备选方案有 m 个属性（例如精度、效率、价格、交货日期、机械功能等），用 $j(j=1, 2, \cdots, m)$ 表示。每个属性的权重系数为 ω_1，ω_2，$\cdots$，ω_m，其中，$\sum_{j=1}^{m}\omega_j=1(\omega_j>0)$。备选方案 d_i 关于属性 j 的评估值表示为 $a_{ij}(\geqslant 0, \sum_{i=1}^{n}a_{ij}=1)$，该值越大，表明该方案越可取。备选方案 d_i 的评估值则为 $\sum_{j=1}^{m}\omega_{ij}a_{ij}$，拥有最高评价值的备选方案为最优方案。

7.2.2　用配对比较法计算属性的权重系数

配对比较法（Pair Comparison Method）通常用来合理定义属性 m（评价因子）的权重系数[1]。表 7.1 所示为对 4 个属性进行配对比较的矩阵。每个因子在垂直方向排列为 $i(i=1, 2, 3, 4)$，相同因子在水平方向上排列为 $j(j=1, 2, 3, 4)$。由决策者指定因子 i 和 j 集合之间关系的重要程度，并以表格形式给出结果。表 7.2 所示为在因子 i 和 j 之间进行配对比较的重要性值 a_{ij}。由决策者选出

每个配对比较的最佳值，当需要更高精度评价的时候，可以用插入中间值的方法把重要性划分更多等级，例如在表7.2中插入2、4、6、8。在表7.1中，$a_{ii}=1$，$a_{ij}=1/a_{ji}$。

如果只比较两个评估因子，人工配对比较法能轻松地做出选择；如果同时考虑多个评估因子，使用这种方法有助于决策者选出最优解。

表7.1 对4个属性进行配对比较的矩阵（$m=4$）（$a_{ii}=1$，$a_{ij}=1/a_{ji}$）

j \ i	因子1	因子2	因子3	因子4
因子1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
因子2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
因子3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
因子4	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}

表7.2 在因子i和j之间进行配对比较的重要性值a_{ij}

因子i和j相比较	a_{ij}
同等重要	1
略微重要	3
比较重要	5
非常重要	7
极其重要	9

当m个权重系数被表示为$(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m)(=\{\omega\}^T)$，并且有一个表7.1所示的配对比较矩阵$A$时，权重系数$\{\omega\}$则可以通过解下面的特征值方程（Eigenvalue Equation）获得。其中，m表示评估因子数量：

$$A\{\omega\}=m\{\omega\} \tag{7.1}$$

矩阵A则可用权重系数$(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m)$表示为

$$A=\begin{bmatrix} 1 & \omega_1/\omega_2 & \cdots & \omega_1/\omega_m \\ \omega_2/\omega_1 & 1 & \cdots & \omega_2/\omega_m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_m/\omega_1 & \omega_m/\omega_2 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

以上矩阵A表示一系列理想的配对比较。这些比较完全一致，没有冗余，并且特征值λ和m一致。如果从第二行开始，以下行元素的值都大于第一行的值，且拥有固定的比值，则矩阵的秩为1。在m个特征值中，只有一个特征值为

正数 m，其余为0。

在实际中，配对比较矩阵 A 很可能不同于上面提到的理想情况，特征值 λ_{max} 与 m 不一致。配对比较结果是否充分一致，可以通过一致性指数 CI 评估。CI 用来描述 λ_{max} 与 m 之间的差异度，其表达式为

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \tag{7.2}$$

当矩阵完全一致时，CI 的大小为0。CI 越大，表明一致性越低。当 CI 超过0.1时，需要重新考虑配对比较结果，必要时还要进行修改。通常情况下，获得的权重系数值可以标准化为 $\sum_{j=1}^{m} \omega_j = 1(\omega_j \geqslant 0)$ 。当评估因子的数量为 m 时，配对比较的数量则为 $m(m-1)/2$。因此，使用一部分冗余信息可以确定权重系数，最终结果也不会受到非理想一致性的影响。

表7.3所示为一个属性之间的配对比较矩阵。其中，有4个评估因子：传输重量、运行精度、运行效率和产品成本。这4个评估因子用来描述特定环境下机器人的某些使用问题。

表7.3 一个属性之间的配对比较矩阵

j \ i	传输重量	运行精度	运行效率	产品成本
传输重量	1	3	1/3	3
运行精度	1/3	1	1/3	3
运行效率	3	3	1	5
产品成本	1/3	1/3	1/5	1

所求问题的特征值为4.197，通过计算特征向量，可以得出4个评估因子的标准化权重系数为（ω_1，ω_2，ω_3，ω_4）=(0.265，0.151，0.508，0.075)。权重系数对应的 CI 为

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} = \frac{4.197 - 4}{4 - 1} = 0.0657$$

CI 小于0.1，因此可以认为一致性是充分的。

7.2.3 用层次分析法选择最佳方案

层次分析法（The Analytic Hierarchy Process，AHP）是在20世纪70年代由T. L. Saaty 提出的，它用来寻求最接近目标的优化解[1]。AHP方法中的层次结构如图7.1所示。它把决策问题构建为一个包含三个层的层次结构，分别是：最终目标、评价标准和备选方案。

例如对于前面提到的工业机器人的选择问题，最终目标是最大化用户的满意

度，评价目标是可传输工件的重量、运行精度、运行效率和产品成本，备选设计方案有 D_1，D_2，…，D_5。首先，利用上述配对比较法可以得到选择工业机器人的评价标准，权重系数 $\omega_{A_j}(j=1, 2, \cdots, m)$ 表示评价标准的重要程度。然后，从每个评价标准出发，为每个备选方案的可用度定义额外的权重系数，也就是用配对比较法求解备选方案的权重系数 $\omega_{B_iA_j}$，这样就定义了 n 个备选方案的 m 个评价标准的权重系数。在机器人的选择问题中，首先要获得每个传输重量评价标准的权重系数，将其作为备选方案关于传输重量的可用度，然后从运行精度方面考虑，用同样的方法获得关于运行精度的可用度，为其他所有评价标准持续执行这一过程。最后，把公式（7.3）中的 $\omega_{B_iA_j}$和 ω_{A_j}相乘，所得即是备选方案 i 的组合权重系数 ω_{C_i}。拥有最大 ω_{C_i}值的备选方案就是最接近最终目标的优化方案。因此，AHP 方法包含有分层确定权重的过程。

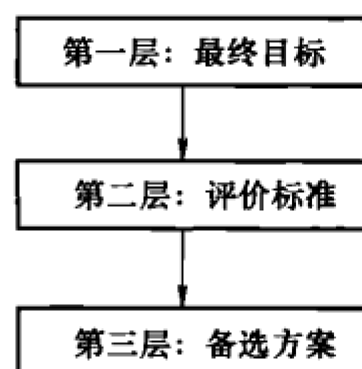


图 7.1　AHP 方法中的层次结构

$$A=\begin{bmatrix}\omega_{B_1A_1} & \omega_{B_1A_2} & \cdots & \omega_{B_1A_m}\\ \omega_{B_2A_1} & \omega_{B_2A_2} & \cdots & \omega_{B_2A_m}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \omega_{BA_1} & \omega_{BA_2} & \cdots & \omega_{B_nA_m}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega_{A_1}\\ \omega_{A_2}\\ \vdots\\ \omega_{A_m}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\omega_{C_1}\\ \omega_{C_2}\\ \vdots\\ \omega_{C_n}\end{Bmatrix} \tag{7.3}$$

7.2.4　特定情况下的主观概率决策法

现实世界总是存在着各种不确定性因素，例如天气（明天的天气或季节性的温度变化）和（短期或长期的）企业经营状况。经营状况中的不确定性因素包括三种情况：盈利经营（$j=1$）、平稳经营（$j=2$）和亏损经营（$j=3$）。

此处，我们来考虑一个问题：如何从两个方案 d_1、d_2中选择较优的一个。d_1为新建一个工厂，d_2为维修现有工厂。如果把备选方案 $i(d_i)$对于评价因子 j 的效力记为 $u_{ij}(d_i)$，备选方案 d_i的效力 E_i则为 $E_i=\sum_{j=1}^{3}p_ju_{ij}(d_i)$。其中，$p_j$表示主观选择评价因子 j 的概率，$\sum_{j=1}^{3}p_j=1$。某经济状况出现的概率可以作为与效力 u_{ij}（d_i）相乘的权重系数，拥有最大效力值的备选方案即是较优解。下面用一个简单的例子说明这一优化过程。

① 新建一个工厂的相关评价数据如表 7.4 所示。对于表中的值，$E_1=0.3\times5+0.2\times1+0.5\times(-5)=-0.8$。

表 7.4　新建一个工厂的相关评价数据

不确定因子 j	出现概率 p_j	效力 $u_j(d_1)$
盈利经营	0.3	5
平稳经营	0.2	1
亏损经营	0.5	-5

② 维修现有工厂的相关评价数据如表 7.5 所示。对于表中的数值，$E_1=0.3\times(-3)+0.2\times2+0.5\times3=1$。

表 7.5　维修现有工厂的相关评价数据

不确定因子 j	出现概率 p_j	效力 $u_j(d_2)$
盈利经营	0.3	-3
平稳经营	0.2	2
亏损经营	0.5	3

基于以上计算结果，维修现有工厂的方案具有较大值，是较优的解决方案。

7.2.5　决策者个人偏好对决策的影响

决策者的个人偏好会严重影响决策的制订。表 7.6 所示为三种不确定情况下选择方案 i 所能带来的收益 g_{ij}。其中，三种不确定情况为：盈利经营（$j=1$）、平稳经营（$j=2$）和亏损经营（$j=3$）。

表 7.6　三种不确定情况下选择方案 i 所能带来的收益（g_{ij}）

不确定情况 j / 方案 i	盈利经营	平稳经营	亏损经营
新建一个工厂	4	1	-4
维修现有工厂	-2	2	3

（1）最大均值准则（Maximum Mean Criterion）

对于所有不确定性情况，选择拥有最大均值收益的方案。在关于新建一个工厂还是维修现有工厂的例子中，新建一个工厂对于所有不确定因素的收益为1/3，而维修现有工厂的收益是 1。很明显，维修现有工厂是明智之举。这种方法看上去很有道理，但当均值受到收益表中特殊值的影响较大时，最终结果可能不是最优的。当收益表中的值适当，并迭代进行决策，这种方法仍然合理、可靠。

（2）最大最小值准则（Max-min Criterion）

对于所有备选方案，考虑最不想看到的经营状况，拥有最大效力的方案就可以作为最优解。也就是说，首先要求出方案 i 在最不愿看到的状况下的效力 U_i：

$$U_i=\min_j g_{ij}$$

拥有最大效力值U_i的方案i即是最优解，最大最小值准则较为悲观。在前面的例子中，新建一个工厂在最不愿看到的情况（最差的经营状况）下的效力是-4,维修现有工厂在最差的情况（良好的经营状况）下的效力是-2。同样，拥有较大效力值的是维修现有工厂，这一方案仍然是最优解。

（3）最大最大值（Max-max Criterion）准则

此处关注最理想的经营状况，在此情况下拥有最大效力的方案即是最优解。也就是说，首先要得到方案i的最大效力U_i：

$$U_i = \max_j g_{ij}$$

拥有最大Ui值的方案i即是最优解。最大最大值准则比较乐观，包括有碰运气的成分。在前面的例子中，最佳情况（盈利经营）下新建一个工厂的效力为4，而最差情况（亏损经营）下维修现有工厂的效力为3。用这个标准衡量，新建一个工厂似乎是最佳方案。

（4）最小最大惋惜准则（Regret Minimax Criterion）

此处的惋惜（Regret）程度等于在不确定情况下选择某个方案的效力与实际所选方案的效力之差，需要考虑每个方案的最差情况。在最差情况下，拥有最小惋惜程度的方案即是最优解。也就是说，方案i的最小最大惋惜程度为

$$U_i = \max_j \ (\max_k g_{ik} - g_{ij})$$

式中，$(\max_k g_{ik} - g_{ij}$等于方案i的惋惜程度。

拥有最小U_i值的方案i就是最优方案，这一准则其实属于悲观型。在前面的例子中，新建一个工厂的最差情况是亏损经营，其惋惜程度为7[3-(-4)=7];而维修现有工厂的最差情况是盈利经营，其惋惜程度为6[4-(-2)=6]。用这一准则来衡量的话，拥有最小惋惜程度的方案——维修现有工厂是最优解。

（5）中间准则（Intermediate Ciriterion）

以下方程可用来与适当的权重系数ω一同表示悲观和乐观之间的个人喜好标准：

$$U_i = \omega \min_j g_{ij} + (1-\omega) \max_j g_{ij} \qquad 0 \leqslant \omega \leqslant 1$$

在实际的决策过程中，需要对以上标准进行适当的修正才能使用。但对于所有情况来说，使用以上方法对优化问题进行逻辑评价和检验，几乎总能产生对于最终决策有用的参考数据。

7.3 协同环境下的决策方法

协同环境下的决策通常涉及同一组内人员所制订决策一致性的问题。由于每个成员的努力，专家知识、技术和智慧的结合，组决策拥有更大的潜力，能提供

更好的解决方案。但个人成员可能会尝试延长自己的可用决策时间，以寻求各种各样的个人利益或个人行为的灵活性，所有这些都可能会阻碍优化问题的顺利求解。呼声较大、拥有较高职位或有身份的人员都可能会阻碍协同决策的达成，即便在最初他们并不是制订这类决策的最佳人选。在这种情况下，产生负协同效应的几率会增加。因此，构建并使用支持理性妥协的系统，提升正协同效应能带来的良好收益才是明智之举。如果能完全最小化或阻止消极的个人行为（不合理的固执己见或纯粹的哗众取宠），协同可能会产生更好的解决方案，也能带来更多的利益。

图 7.2 所示为 4 个决策者 A、B、C 和 D 构成一组对三个产品特征（运行精度、运行效率和制造成本[2]）进行评价，共同制订决策的过程。以下将介绍最基本的决策方法。

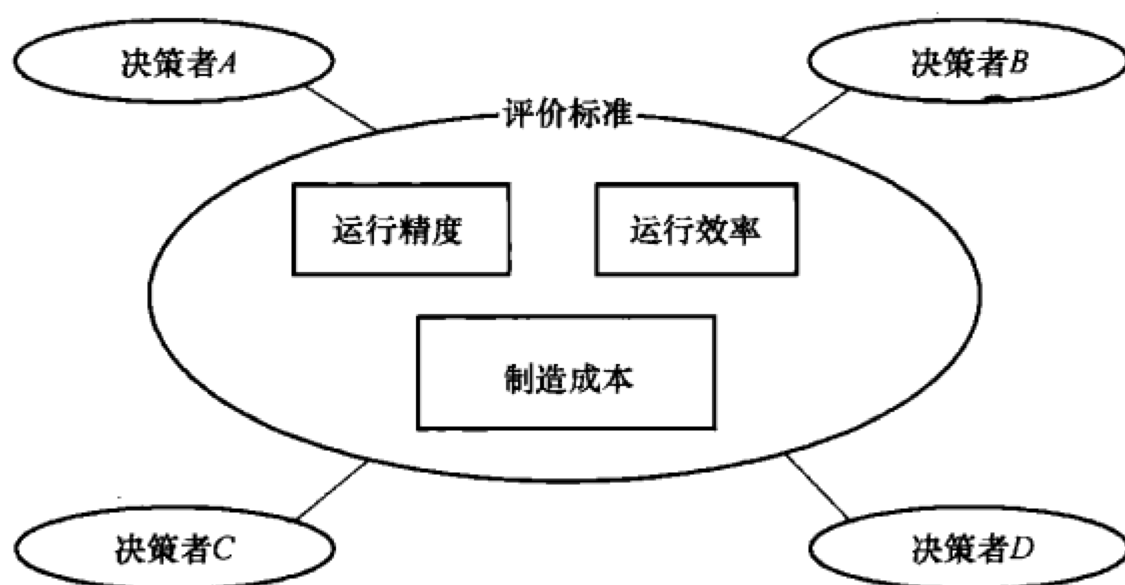


图 7.2　设计问题求解中的组决策

通过配对比较法，每个决策者 i 对应每个产品特征 j 都可得出一个权重系数 ω_{ij}。通常来说，对于某个特征，给出最大值的决策者就是相关领域的专家。然后，每个决策者 i 定义一个满意度函数 S_i，为每个特征 j 定义一个效力函数 s_{ij}，设计变量包括在 s_{ij} 中[3,4]。决策者 i 的满意度函数 S_i 为

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij} s_{ij} \tag{7.4}$$

式中，n 是特征的个数。

定义设计变量 $d_k(k=1,2,\cdots,N)$，这样就可以得出 M 个决策者满意度函数之和的最大化函数：

$$S_g = \sum_{i=1}^{M} S_i \rightarrow \text{maximize}$$

式中，S_g是决策组的满意度。

在决策过程中的这个节点处，可视化地表示满意度函数和每个决策者对于每

个特征的权重系数是非常重要的，这些信息要在所有决策者之间共享。最初，每个决策者可能会设定出不合理的较大的权重系数值和较严苛的满意度条件。如果这样的话，组满意度 S_g 就可能会比较低，这不太符合要求。

为了最大化组满意度 S_g，每个决策者需要协同考虑以下妥协过程：

① 如果需要，重新考虑并修改每个特征的权重系数。

② 如果需要，重新考虑并修改每个特征的满意度。

图7.3所示为满意度函数的变化。其中，水平轴线表示特征 z_{ij}，类似于图2.7中的 ε。如果把 z_{ij} 的目标值 z_{ij1}^* 调整为 z_{ij2}^*，该图表示从点 A 到 B，随着 z_{ij2}^* 满意度的增加，通过某个决策者来提升决策组的满意度可以实现 z_{ij2}^*。

对于给出最大权重系数或最严格满意度函数的决策者，在折中时要优先考虑。图7.4所示为通过协同折中逐步提升组满意度的过程。通过执行以上两个步骤，可以提升组满意度。

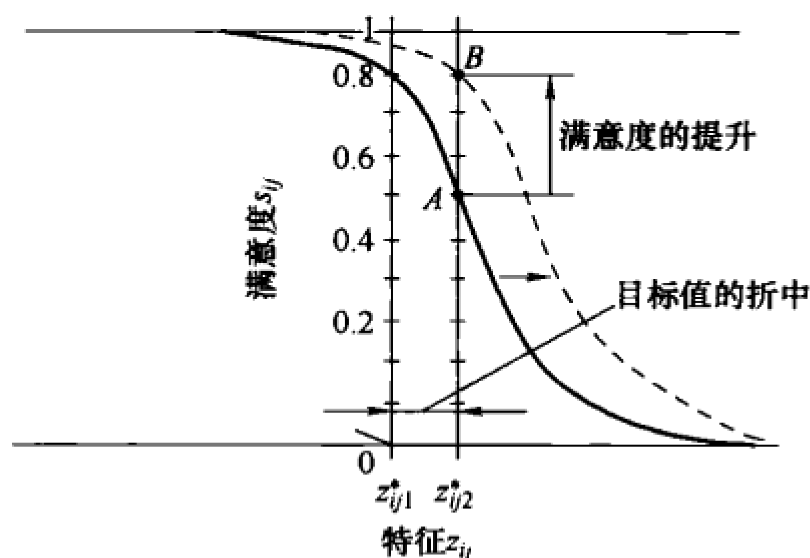


图7.3 满意度函数的变化

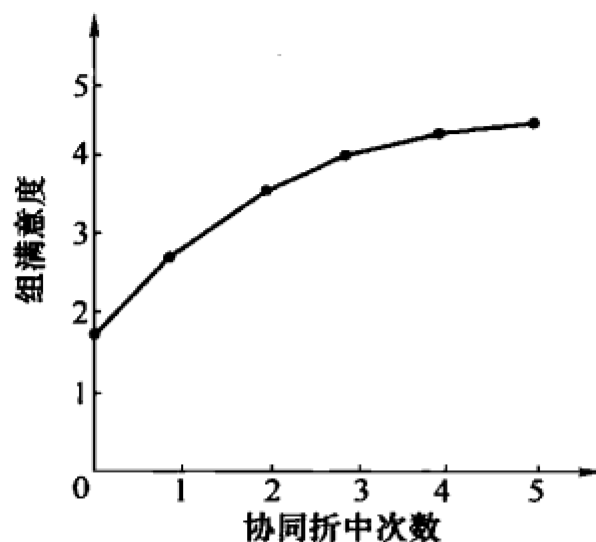


图7.4 通过协同折中逐步提升组满意度的过程

思考题

7.1 阐述组决策的优点和实施困难，总结成功实施组决策的方法。

7.2 讨论在构建能有效用于相似决策问题的决策支持系统时，应考虑哪些因素？

参考文献

1. Saaty TL (1989) The analytic hierarchy process, McGraw-Hill
2. Yoshimura M, Kondo H (1997) Group decision making in product design and manufacturing. In: Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sacramento, California:1–7
3. Keeney RL, Raiffa H (1976) Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs, Wiley, New York
4. Yoshimura M, Kondo H (1996) Product design based on concurrent processing of design and manufacturing information by utility analysis. International journal of concurrent engineering: Research and applications, 4(4):379–388

第 8 章　创意设计的优化与权衡

如前面章节所述，在产品设计与制造中，有效的协同是获得最优产品设计解决方案最有保障的方法。创意设计需要一定量的组员协同工作，第 6.4 节中描述的系统优化策略可用于此类问题的求解。第 8.1 节将描述基于协同技术的产品设计决策方法与程序，并对比它与基于博弈理论的组决策的差异。产品制造依赖于大范围的产业，这些产业内的人员与企业所组成协同组的成败会产生极大的文化影响。对于参与其中的成员来说，所使用的制造技术和所生产产品的质量至关重要。从长远利益来看，无论是否存在冲突，各种团体的合作总是比各自为政、保持现状更为有效。第 8.2 节将从提升产品设计优化方法与策略的成熟度和实用性方面展开，讨论产品设计与制造中自然环境和文化影响相互关联的本质。

8.1　基于协同的创意设计优化

为了获得最好的结果，拥有特定专业知识和先进技能的设计工程师们需要相互协作来完成设计过程。第 3.4 节解释了协同的作用以及它在创新产品制造技术中所扮演的角色，还讨论了选择合适的协同搭档的重要性。第 4.4 节讨论了为产品制造项目选择最佳人员的标准。在这些基于协同概念的活动中，协同成员个体所拥有的知识和技术需要相互结合，这样才能提升设计结果所能带来的经济效益。

第 5.1.6 节介绍了用于搜集与产品设计相关的用户信息的方法。市场情况和产品设计要求常会迅速变化，但总体趋势是使用日渐成熟的产品解决方案。产品设计优化的终极目标不是在既定时间内获得单一的优化解，而是为最终有效的优化解建立良好的基础，以应对随时间变化的复杂的市场需求。与此类似，系统设计优化的目标不仅仅局限于获得全局最优解，而是通过已获得的全局最优解，取得更好的解决方案，以便根据动态变化的需求在其中选择更合适的方案。

第 6.4 节介绍了有效实施产品优化设计的系统设计优化策略，也就是使用简化特征及简化特征之间的优先关系和冲突关系。在协同环境中，工作组的成员可以有效地将他们的知识和专业技能相互结合，分层优化方法和程序在这种环境中仍然有效。

在一般的产品设计优化中，通常把相关的特征包括在目标函数和优化约束的数学表示中，然后利用数学优化方法来求解问题。在图 8.1 中，这些原始特征以

“面层”的形式在最高层显示。然而，如第6.4节所述，只有充分理解设计问题，抓住问题的特征和特征间的相互关系，才能获得真正的全局最优解[1,2]。

在最高层中，把每个原始设计特征分解成更简单的特征，并从这些特征中提取简化特征，这样可以建立分层优化程序的系统结构。持续执行分解和提取过程，直到得到位于最低层的最简单的基本特征。然后考查这些简化特征之间的冲突关系及其优化顺序或优先度。存在冲突关系的简化特征位于相同的较低层级，同时将其作为多目标优化问题求解。根据优化目标的数量不同，位于最高层的原始特征的优化解通常会形成一个帕累托最优解曲线或曲面。这些曲线或曲面是优化解的边界线或面，同时也是改进产品性能特征的障碍。理想状况下，要突破这一障碍，获得更优解。

为了突破现有优化解的边界，需要特别关注那些位于更低层次、存在冲突关系、决定面层形状、成对出现的特征。位于层级优化模型最底层或较低层的特征通常都比较简单，且相互关系非常明显。关注这些位于低层级的简化特征，有益于发现有效突破现有解边界的设计思路，形成新的帕累托最优解曲线或曲面，协同组内的专家也可以更容易地改进设计方案。

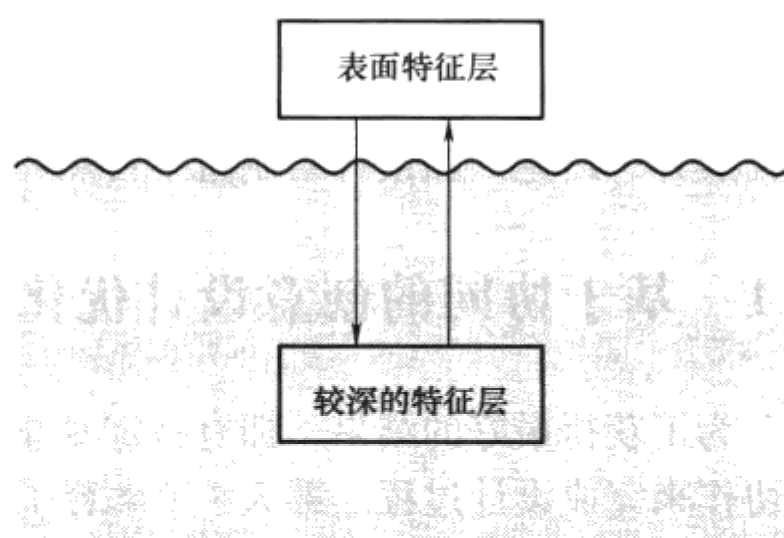


图8.1　表面特征层和较深的特征层

为了在系统设计优化中实施有效协同，需要一个拥有广泛知识和良好组织能力的领导者，若干拥有某个或某些与项目相关领域专业知识的专家。原始特征位于分层设计优化系统最高层，所设计产品的消费者基于两个或三个原始特征决定是否购买产品，此处把这些特征称为表面特征（Surface Characteristic）。

利用协同成员的技术和知识，通过求解分层优化问题，可以得到一个最初的帕累托最优解曲线。把结果显示在目标函数与这一设计解的预期利润组成的坐标空间中，如图8.2所示。为了提高利润，协同的领导者和参与者对方案进行讨论，并确定在目标函数空间中初步要实现的产品设计目标。预期的额外利润能促使协同成员积极努力地工作。重复这一过程，直到得到有效的解决方案。在这种协同中，组内的每个成员都能感觉到自己是集体的一部分，为提升利润作出了贡献。同时，每个协同个体也能因为自己对协同项目的贡献比例而获得回报，对于回报的预期自然会激励每个人全身心投入自己负责的工作。

博弈理论（Game Theory）[3,4]可以为协同项目中的组决策提供有效支持，它受到了广泛地关注和讨论。以上基于协同概念的方法和逻辑程序可以统称为协同

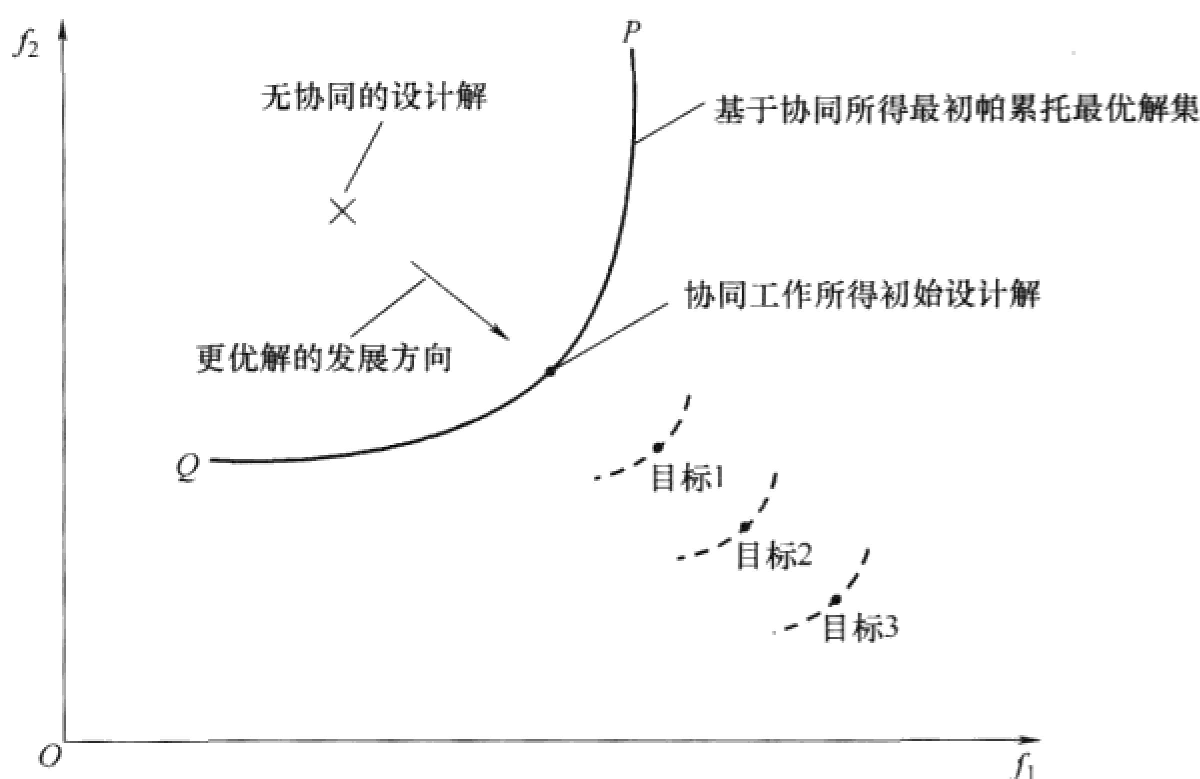


图 8.2　基于协同的设计求解的进化过程

理论（Collaboration Theory）[1,2]。此处将对比它与博弈理论方法的差异。图 8.3 所示为基于博弈理论和协同理论的产品设计活动的对比。图中，圆的大小表示预期利润的总量，灰色区域表示工作组在实施设计活动之前预期的利润。在基于基本博弈理论的设计活动中，每个成员都想用能够最大化个人收益的策略，并对组内其他成员心存疑虑。这种情况会降低实施结果所得的总利润。

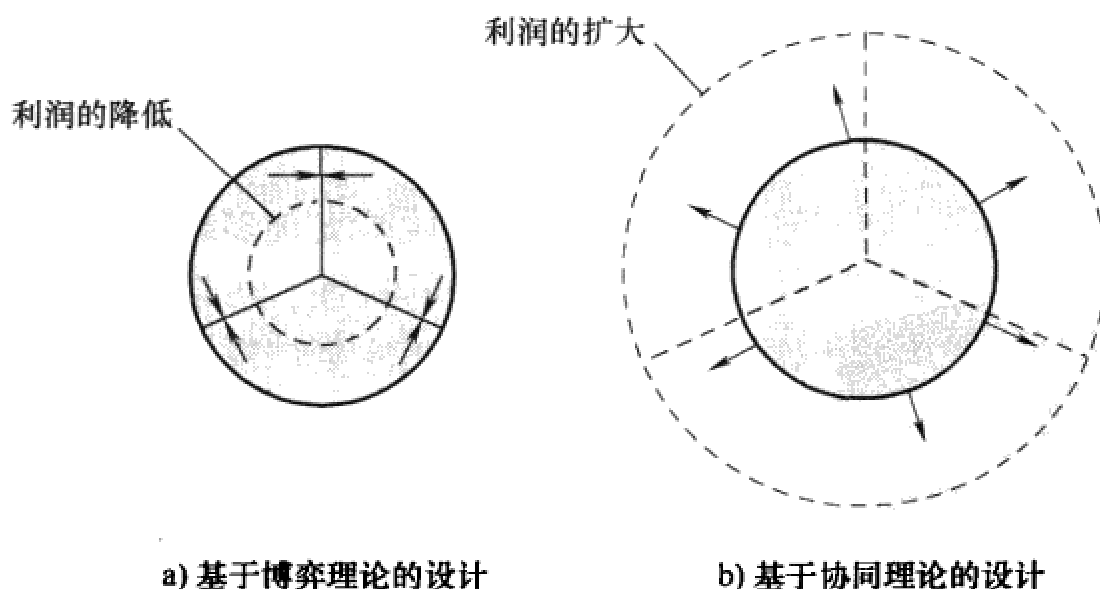


图 8.3　基于博弈理论和协同理论的产品设计活动的对比

而在基于协同理论的设计活动中，每个成员拥有的知识和技术可以协同地相互结合，这将提高最终设计结果产生高利润的概率。在这种情况下，组内的每个成员都能感觉到自己作为集体的一部分为提升利润作出了相应的贡献。如前所述，每个协同人员也能预期得到与自己对项目贡献相对应的收益，这种预期自然会激励每个成员全身心投入，而不是钻营于和组内人员的竞争。

8.2 产品制造的文化影响

如第1、2章所述，产品制造已经得到迅速发展，变得更加复杂，因此需要同时评估大量的相关因素。也就是说，产品制造所要关注的东西已经不再是仅仅创造出满足人们物质需求、功能需求的产品。正如第4章所描述的那样，现在的产品制造还必须考虑产品的美感、人机性能，以改进消费者的心理或文化满意度。理想的目标是：产品制造必须设计并制造出具有吸引力，能与使用环境相协调，对气候、自然资源和本土文化负面影响最小化的产品[5,6]，另外还要满足个人的偏好和品位。这一目标的实现需要系统地考虑各种评价因素。很多产业正逐步意识到，长远的成功依赖于关注那些更高、更远的产品设计因素，这些因素远不是仅仅满足最小的、孤立的、短期的需求。产业的制造、文化影响和繁荣与创意、权衡的关系如图8.4所示。对于真正想繁荣发展的产业来说，产品制造商必须要意识到产品的文化影响，积极处理与自然环境、气候、产品购买者和使用者相关的所有问题，以达到一种平衡状态，只有这样才能真正地提升客户满意度。

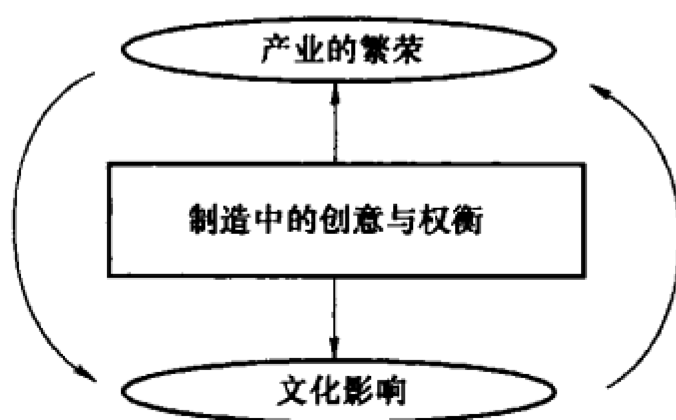


图8.4 产业的制造、文化影响和繁荣与创意、权衡的关系

产品制造中的多元化可以提升客户的个人满意度，并能驱动制造商创造出能与局部环境协调更好的新产品。在产品设计中应用优化技术非常重要，不仅是为了获得更好的设计解，同时这些技术也能使设计解更加多样化。根据特定区域和时间内产品的详细需求不同，利用这种多样化的特性，可以从大量备选方案中选择出满足特定需求的全局优化解。因此，通过关注更广泛的相关因素，优化技术不仅在创造更能提升满意度的产品中有所作为，同时也有助于制造与环境更协调的产品。

思考题

8.1 解释说明为了获得突破现有产品性能和制造成本而采用的协同技术的作用。

8.2 从对文化的正面和负面影响讨论产品制造的特征。

参考文献

1. Yoshimura M, Kikuchi S, Kizu M, Saitou Y (2009) Optimum system design of machine products based on collaboration theory. In: Proceedings of the 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Portugal
2. Yoshimura M, Kikuchi S (2009) Optimization of machine product designs from deeper level characteristics using collaboration theory concepts. In: Proceedings of ASME 2009 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2009-86928
3. Myerson RB (1991) Game theory – analysis of conflict. Harvard University Press, Cambridge
4. Osborne MJ and Rubinstein A (1994) A course in game theory. The MIT Press, Cambridge
5. Watsuji T (1998) Climate and culture – a philosophical study. Translated by Bownas G. Yushodo, Tokyo
6. Nisbett RE (2003) The geography of thought – how Asians and westerners think differently and why. Free Press, New York

[General Information]
书名=产品制造系统设计优化
作者=（美）吉村正孝著
页数=137
出版社=北京市：机械工业出版社
出版日期=2012.08
SS号=13043765
DX号=000008330043
URL=http://book.szdnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000008330043&d=4C98E4F5C20B438E81373613DB98C837